

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAMILA AUGUSTO PERUSSELLO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*)**

CURITIBA

2013

CAMILA AUGUSTO PERUSSELLO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a Dr^a Fernanda de Castilhos

Co-orientadora: Prof^a Dr^a Maria Lúcia Masson

CURITIBA

2013

CAMILA AUGUSTO PERUSSELLO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*)**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores

Orientadora:

Prof^a Dr^a Fernanda de Castilhos
Setor de Tecnologia, UFPR

Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Centro de Tecnologia, UEM

Prof^a Dr^a Viviana Cocco Mariani
Escola Politécnica, PUCPR

Prof. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi
Setor de Tecnologia, UFPR

Prof. Dr. Marcos Rogério Mafra
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 15 de fevereiro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, que tem me iluminado e fortalecido. Agradeço-Lhe sobretudo por me ajudar a enxergar que às vezes, quando as coisas não saem como planejamos, é porque merecemos muito mais do que insistimos em querer para nós.

Agradeço aos meus amados pais, Décio e Regina, pelo amor, pelo apoio e por me servirem como modelos de pessoas dignas e vencedoras.

Agradeço à minha família querida, por todas as alegrias, e em especial à minha amada avó Alda, que está sempre torcendo pela minha felicidade.

Obrigada aos meus amigos e amigas pelo companheirismo, risadas, viagens, conversas, pelas ligações em horários impróprios, seja chorando ou para contar alguma coisa muito boa que não dá pra esperar, enfim... obrigada por multiplicarem as minhas alegrias e me consolarem nos períodos difíceis! Um especial agradecimento à Ju Ganci (mais do que amiga, uma irmã!), Aline Fracasso, Ingrid, Bel e Solange, vocês moram no meu coração!!

Agradeço às amigas e colegas queridas que conheci no Programa: Aline Fracasso (você aqui de novo! – muito obrigada pela amizade maravilhosa), Érika, Cátia, Ana Mery, Dani Carpiné, Priscila Muller, Mariana Egea, Milene (obrigada pela amizade, pelas confissões, pelas conversas sobre a vida pelo Skype, em horários loucos, quando estávamos ambas longe do Brasil), Flávia e Valesca. Obrigada a todos os colegas de Mestrado e Doutorado com quem eu pude trocar informações ou tecer agradáveis conversas.

Obrigada à prof. Fernanda de Castilhos pela orientação, pela paciência e por toda a atenção com que sempre me tratou. Um especial agradecimento por sua calma e compreensão durante a minha loucura de fim de Doutorado! Obrigada à prof. Maria Lúcia pela orientação, pelo sempre bom humor e pelas palavras confortadoras que recebi em meio à burocracia do visto para a Austrália. Agradeço à CAPES e à UFPR pelo suporte financeiro e pela maravilhosa e abençoada experiência do Doutorado Sanduíche na Austrália. Meus agradecimentos ao meu orientador na *Queensland University of Technology*, Dr. Azharul Karim, pela orientação, pelo carinho com que me recebeu e por me fazer sentir parte do grupo de pesquisa desde o primeiro dia em que estive na

universidade. Ao meu querido amigo Chandan Kumar Ray, muito obrigada por toda a ajuda de caráter acadêmico e pessoal – pelas visitas às casas para alugar, pelos passeios em Brisbane e Gold Coast, pelas lições e auxílios de última hora relacionados ao COMSOL, por me esperar no aeroporto até meu último minuto na Austrália... agradeço de coração!

Obrigada à PUCPR e à prof. Viviana Cocco Mariani pela disponibilização do laboratório de Ciências Térmicas do curso de Engenharia Mecânica e pelo empréstimo de materiais importantes para a realização deste trabalho.

Obrigada ao técnico Marcelo Zadorecki pelo auxílio nas análises e compras de material e pela amizade que conquistamos em 2012. Agradeço ao Eriel pela ajuda valiosa nas análises cromatográficas. Obrigada ao Paulo Krainski pela amizade e pelo capricho que sempre dedica ao seu trabalho como secretário do Programa. Agradeço também à Camila Zorzetto, aluna de Iniciação Científica, pela participação nos experimentos em 2011.

Pelas felicidades de todos os tipos, pelo ultrapassar de limites, pelo crescimento pessoal, pelas conquistas, pela riqueza de conhecimentos, pelo amor à minha profissão, pelas dores que se transformaram em força e aprendizado... por tudo isto: obrigada à vida!!!

“O que eu faço é uma gota no meio de um oceano. Mas sem ela, o oceano será menor.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

O consumo do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tem aumentado em decorrência da comprovação científica de suas atividades prebiótica e antioxidante e de seu baixo valor calórico. Considerando que sua vida útil é muito reduzida em condições ambientes, métodos de desidratação têm sido empregados a fim de extendê-la. Este trabalho analisa numericamente e experimentalmente a secagem osmo-convectiva de raízes de yacon. Fatias de yacon com espessura de 2 mm foram submetidas ao tratamento osmótico por 2 horas em solução de sucralose 20% (m/m) e proporção entre yacon e solução de 1:5 (m/m). Em seguida, foram desidratadas por 3 horas em um secador de bandejas com ventilação forçada. Os experimentos, realizados em triplicata, seguiram um planejamento fatorial completo 2^3 . Testou-se a influência de dois níveis de agitação (0 cm/s e 4 cm/s) e de temperatura (30°C e 50°C) para a desidratação osmótica, e de dois níveis de temperatura (60°C e 80°C) para a etapa de secagem convectiva nos seguintes parâmetros de qualidade do produto final: conteúdo de umidade, concentração de sólidos solúveis, luminosidade e mudança de cor. Durante o processo, também foram determinadas as variações de temperatura, atividade de água, diâmetro, absorção de sucralose e composição centesimal. As condições de processamento influenciaram estatisticamente nos parâmetros de qualidade do produto final, assim como na absorção de sucralose e no encolhimento. Por meio do processo de secagem osmo-convectiva, foi possível obter fatias de yacon com baixa atividade de água e atributos sensoriais atrativos para o consumidor. A aplicação do tratamento osmótico reduziu os graus de escurecimento e de encolhimento e os danos estruturais, tais como distorção angular e aparecimento de fissuras, das fatias submetidas à secagem convectiva.

A análise numérica das transferências de calor e de massa em regime transiente foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos, baseada na solução bidimensional das Leis de Fourier e Fick, utilizando-se o software COMSOL *Multiphysics*® versão 4.1. As propriedades termofísicas do yacon, requeridas na modelagem, foram obtidas por meio de correlações que se baseiam na composição centesimal do produto e/ou através de medição direta. Com base nos resultados experimentais, foram obtidos modelos empíricos para a predição das propriedades massa específica, calor específico e condutividade térmica do yacon, baseando-se no conteúdo de umidade do produto. Os resultados numéricos para as variações de umidade e temperatura e para a absorção de sucralose foram comparados com os dados experimentais, obtendo-se concordância satisfatória ($R^2 > 0,94$).

Palavras-chave: Secagem Osmo-convectiva, Yacon, Sucralose, Propriedades Termofísicas, Método dos Elementos Finitos, Modelagem Numérica.

ABSTRACT

The consumption of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) has increased due to its scientifically proven prebiotic and antioxidant activities and its low caloric value. Whereas its shelf-life is very low at ambient conditions, dehydration methods have been employed to extend it. This work analyzes numerically and experimentally the osmo-convective drying of yacon roots. Slices of yacon with a width of 2 mm were submitted to the osmotic treatment during 2 hours in a 20% (w/w) sucralose solution with a 1:5 (w/w) proportion between product and solution. The slices were then dehydrated in a tray dryer with forced ventilation. The experiments, carried out in triplicate, followed a complete 2^3 factorial design. The influence of two levels of stirring (0 cm/s and 4 cm/s) and temperature (30°C and 50°C) for the osmotic treatment, and of two levels of temperature (60°C and 80°C) for the convective drying was tested on the final product quality parameters, namely moisture content, soluble solids concentration, luminosity and color change. During the process, several determinations were also conducted, such as the variations of temperature, water activity, diameter, sucralose uptake and centesimal composition. The process conditions statistically influenced on the final product quality parameters and also on the sucralose uptake and shrinkage. Using the osmo-convective drying process, it was feasible to obtain yacon slices with low water activity and attractive sensorial attributes. The application of the osmotic treatment before the convective drying provided quality gains to the final product, such as low browning and shrinkage rates and reduction of the structural damages towards angular distortions and fissures.

The numerical analysis of the heat and mass transfer problem in transient state was conducted using the Finite Element Method, basing on the 2D solution of the Fourier and Fick Laws, using the software COMSOL Multiphysics® version 4.1. The thermophysical properties of yacon, required in the modeling, were obtained through correlations based on the product centesimal composition and/or through direct measurement. Basing on the experimental results, empirical models were obtained in order to predict specific mass, specific heat and thermal conductivity of yacon in function of its moisture content. A satisfactory concordance ($R^2 > 0.94$) between numerical and experimental results for the variations of temperature and moisture and sucralose uptake was verified.

Keywords: Osmo-convective Drying, Yacon, Sucralose, Thermophysical Properties, Finite Element Method, Numerical Modeling.

SUMÁRIO

APROVAÇÃO.....	3
AGRADECIMENTOS	4
CITAÇÃO	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS.....	15
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações iniciais.....	17
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Objetivos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Yacon	23
2.1.1 Origem e caracterização	23
2.1.2 Potenciais nutricionais do yacon e formas de consumo	29
2.1.3 Aspectos tecnológicos do processamento do yacon.....	32
2.2 Processo de desidratação osmótica.....	34
2.2.1 Fundamentos	34
2.2.2 Efeito das variáveis de processo	38
2.3 Processo de secagem convectiva	40
2.3.1 Fundamentos	40
2.3.2 Efeito das variáveis de processo.....	47
2.3.3 Secagem convectiva precedida de desidratação osmótica.....	48
2.4 Modelagem de processos de secagem osmo-convectiva	49
2.5 Síntese do estudo bibliográfico	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 Materiais e reagentes	54
3.2 Metodologia	54
3.2.1 Composição centesimal do yacon <i>in natura</i> e após o tratamento osmótico.....	55
3.2.2 Conteúdo de açúcares do yacon <i>in natura</i> e desidratado osmoticamente	55

3.2.3 Conteúdo de sólidos solúveis do yacon <i>in natura</i> e desidratado osmoticamente	56
3.2.4 Perfil de encolhimento do yacon durante a secagem osmo-convectiva	56
3.2.5 Perfis de cor e de grau de escurecimento do yacon durante a secagem osmo-convectiva	57
3.2.6 Perfis de umidade e temperatura do yacon durante a secagem osmo-convectiva	58
3.2.7 Atividade de água do yacon durante a secagem osmo-convectiva	58
3.2.8 Planejamento experimental	59
3.2.9 Ensaios de desidratação osmótica	60
3.2.10 Ensaios de secagem convectiva	62
3.2.11 Análise estatística dos resultados	63
3.2.12 Modelagem matemática do processo	63
3.2.13 Propriedades termofísicas	66
3.2.14 Coeficientes de transferência de calor e de massa	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1 Caracterização do yacon <i>in natura</i>	72
4.2 Processo de desidratação osmótica	72
4.3 Processo de secagem convectiva	80
4.4 Modelagem matemática do processo de secagem osmo-convectiva	89
5. CONCLUSÕES	111
5.1 Considerações finais	111
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Detalhes da planta de yacon: (a) partes aéreas e subterrâneas; (b) inflorescências; (c) folhas; (d) cepa e raízes tuberosas.

Figura 2.2 – Yacon *in natura*.

Figura 2.3 – Fórmula estrutural das moléculas de FOS.

Figura 2.4 – Produtos derivados do yacon: (a) yacon em pó; (b) chips (fatias desidratadas); (c) chá de folhas de yacon; (d) suco; (e) Xarope; (f) cereal matinal; (g) pasta de yacon com chocolate; (h) yacon em cápsulas; (i) extrato de yacon em gotas.

Figura 2.5 – Transferência de massa no processo de desidratação osmótica.

Figura 2.6 – Isoterma de desorção de umidade.

Figura 2.7 – Perda de umidade de um alimento em função do tempo de secagem.

Figura 2.8 – Curva típica da taxa de secagem para um alimento.

Figura 2.9 – Reações deteriorativas em alimentos em função da atividade de água.

Figura 3.1 – Método de determinação do diâmetro das fatias de yacon.

Figura 3.2 – Aparato experimental para a desidratação osmótica.

Figura 3.3 – Aparato experimental para a secagem convectiva: (a) Secador de bandejas; (b) Esquema de funcionamento do mesmo.

Figura 3.4 – Domínio computacional.

Figura 4.1 – Variação de massa do yacon durante a desidratação osmótica.

Figura 4.2 – Cromatograma contendo a curva para avaliação de FOS no yacon *in natura* e a curva padrão de 1000 ppm de sucralose.

Figura 4.3 – Cromatogramas para a sucralose nas amostras submetidas ao tratamento osmótico sob as condições de: (a) 30°C e 0 cm/s; (b) 30°C e 4 cm/s; (c) 50°C e 0 cm/s; (d) 50°C e 4 cm/s.

Figura 4.4 – Fatias de yacon *in natura* e após a desidratação osmótica.

Figura 4.5 – Efeito da desidratação osmótica no aspecto do yacon conduzida à temperatura de: (a) 30°C e (b) 50°C.

Figura 4.6 – Variação de massa do yacon durante a secagem convectiva.

Figura 4.7 – Atividade de água do yacon durante a secagem convectiva.

Figura 4.8 – Yacon seco até atividade de água próxima de 0,3.

Figura 4.9 – Atividade de água *versus* conteúdo de umidade do yacon.

Figura 4.10 – Aparência das fatias de yacon desidratadas sob diferentes condições de processo.

Figura 4.11 – Fatias de yacon desidratadas (a) com o pré-tratamento osmótico e (b) sem o pré-tratamento osmótico.

Figura 4.12 – Gráficos de Pareto para ilustração dos efeitos das variáveis estudadas nos atributos de qualidade do yacon a 95% de intervalos de confiança: (a) y_1 = conteúdo de umidade; (b) y_2 = mudança de cor; e (c) y_3 = concentração de sólidos solúveis.

Figura 4.13 – Propriedades termofísicas do yacon durante a secagem convectiva em função da umidade: (a) massa específica, (b) calor específico, e (c) condutividade térmica.

Figura 4.14 – Comparação entre as propriedades termofísicas do yacon durante a secagem convectiva obtidas por diferentes metodologias: (a) massa específica, (b) calor específico, e (c) condutividade térmica.

Figura 4.15 – Variação experimental de temperatura durante a desidratação osmótica do yacon.

Figura 4.16 – Algoritmo numérico.

Figura 4.17 – Indicação do ponto da fatia para o qual foram comparados os resultados numéricos e experimentais.

Figura 4.18 – Variação de temperatura do yacon durante a desidratação osmótica conduzida: (a) sem agitação; (b) com agitação; (c) sem agitação no início do processo; (d) com agitação no início do processo.

Figura 4.19 – Perfil de temperatura para uma fatia de yacon em 1 minuto de desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s.

Figura 4.20 – Variação de temperatura do yacon no início da desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s, obtida numericamente.

Figura 4.21 – Variação de umidade para o yacon durante a desidratação osmótica conduzida às temperaturas de 30°C e 50°C: (a) sem agitação; (b) com agitação.

Figura 4.22 – Absorção de sucralose para o yacon durante o tratamento osmótico conduzido às temperaturas de 30°C e 50°C: (a) sem agitação; (b) com agitação.

Figura 4.23 – Perfil de (a) conteúdo de umidade e (b) absorção de sucralose para uma fatia de yacon ao final da desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s.

Figura 4.24 – Resultados numéricos para a variação de (a) temperatura, (b) umidade e (c) absorção de sucralose do yacon durante a desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s para malhas computacionais compostas por diferentes números de elementos triangulares: (1) 612, (2) 116 e (3) 40.

Figura 4.25 – Variação de temperatura para o yacon durante a secagem convectiva para o Teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C) e o Teste 8 (50°C, 4 cm/s e 80°C).

Figura 4.26 – Variação de umidade para o yacon durante a secagem convectiva para o Teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C) e o Teste 8 (50°C, 4 cm/s e 80°C).

Figura 4.27 – Perfil de temperatura para uma fatia de yacon aos 10 minutos de secagem convectiva para o teste conduzido a 30°C, 0 cm/s e 60°C.

Figura 4.28 – Perfil de umidade para uma fatia de yacon ao final da secagem convectiva conduzida a 30°C, 0 cm/s e 60°C.

Figura 4.29 – Resultados numéricos para a variação de (a) temperatura e (b) umidade do yacon durante a secagem convectiva conduzida a 30°C, 0 cm/s e 60°C para malhas computacionais compostas por diferentes números de elementos triangulares: (1) 612, (2) 116 e (3) 40.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição centesimal do yacon *in natura* em base úmida.

Tabela 3.1 – Planejamento experimental.

Tabela 3.2 – Testes resultantes do planejamento experimental.

Tabela 4.1 – Composição centesimal do yacon *in natura*.

Tabela 4.2 – Variação da massa (ΔM), conteúdo de água (ΔW) e conteúdo de sólidos totais (ΔS) do yacon durante a desidratação osmótica.

Tabela 4.3 – Composição centesimal do yacon *in natura* e submetido a diferentes tratamentos osmóticos.

Tabela 4.4 – Conteúdo de sólidos solúveis (SS) e de sucralose do yacon submetido à desidratação osmótica.

Tabela 4.5 – Variação de luminosidade (ΔL^*), mudança de cor (ΔE) e encolhimento (ΔD) do yacon submetido a diferentes tratamentos osmóticos.

Tabela 4.6 – Conteúdo de umidade do yacon após 3 horas de secagem osmoconvectiva.

Tabela 4.7 – Conteúdo de umidade, atividade de água (A_a) e tempo finais para a secagem convectiva do yacon.

Tabela 4.8 – Composição centesimal do yacon seco.

Tabela 4.9 – Resultados experimentais para o grau de escurecimento (ΔL^*), a mudança de cor (ΔE) e o encolhimento (ΔD) das fatias secas de yacon.

Tabela 4.10 – Propriedades termofísicas do yacon durante a desidratação osmótica.

Tabela 4.11 – Modelos matemáticos ajustados para cálculo das propriedades termofísicas do yacon em função da umidade.

Tabela 4.12 – Coeficientes de transferência de calor e de massa para a desidratação osmótica.

Tabela 4.13 – Coeficientes de transferência de calor e de massa para a secagem convectiva.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a^* - coordenada *chroma* na faixa do verde ao vermelho
 Aa - atividade de água
 b^* - coordenada *chroma* na faixa do azul ao amarelo
 $b.u.$ - base úmida
 $b.s.$ - base seca
 C_{eq} - concentração de equilíbrio [mol/m³]
 C - concentração da espécie i no interior da fatia de yacon [mol/m³]
 C_p - calor específico [J/kg.K]
 D - diâmetro da fatia de yacon [m]
 D_{ef} - coeficiente de difusão [m²/s]
FOS - frutooligossacarídeos
 g - aceleração da gravidade [m/s²]
 Gr - número de Grashof
 h - coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K]
 h_m - coeficiente de transferência de massa por convecção [m²/s]
HPLC - cromatografia líquida de alta eficiência
 i - índice referente à espécie difusiva em estudo (água ou sucralose)
 k - condutividade térmica [W/m.K]
 L - comprimento característico de um cilindro [m]
 L^* - luminosidade
 M - massa [g]
 Mc - massa normalizada [g]
MDF - Método das Diferenças Finitas
MEF - Método dos Elementos Finitos
MVF - Método dos Volumes Finitos
 Nu - número de Nusselt
P.A. - padrão analítico
POD - peroxidase
PPO - polifenoloxidase
PVDF - fluoreto de polivinilideno
 Pr - número de Prandtl

r - coordenada espacial [m]
 R - raio da fatia de yacon [m]
 R^2 - coeficiente de correlação
 Ra - número de Rayleigh
 Re - número de Reynolds
 S - massa de sólidos [g]
 SS - conteúdo de sólidos solúveis [°Brix]
 T - temperatura [K]
 t - tempo de processo [s]
 UR - umidade relativa do ar [%]
 v - velocidade [m/s]
 V - volume da fatia [m³]
 x - variável independente do planejamento experimental
 X - conteúdo de umidade em base seca [g/g] ou em base úmida [%]
 x_j - fração mássica de cada componente puro de um alimento
 x_{vj} - fração volumétrica de cada componente puro de um alimento
 W - massa de água [g]
 y - variável dependente do planejamento experimental
 z - coordenada espacial [m]
 α - difusividade térmica [kg/m.s]
 β - coeficiente de expansão térmica [m⁻¹]
 ΔE - mudança de cor
 ε - espessura da fatia [m]
 ∞ - índice referente ao fluido de secagem (ar ou solução osmótica)
 μ - viscosidade [Pa.s]
 ρ - massa específica [kg/m³]

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Até 40% da produção agroindustrial nos países em desenvolvimento é perdida devido à falta de condições de armazenamento ou processamento (KARIM e HAWLADER, 2005). Significativo esforço tem sido feito para aproveitar de forma efetiva o potencial dos produtos agrícolas. Neste contexto, o yacon, um tubérculo de origem andina, produzido no Brasil, que apresenta elevado valor nutricional e propriedades funcionais importantes, pode ter seu potencial aproveitado por meio da aplicação da tecnologia de secagem osmo-convectiva. O uso do yacon está relacionado ao seu poder prebiótico, devido à presença de frutanos, como os frutooligossacarídeos (FOS) e as inulinas, os quais promovem atividade bifidogênica, beneficiando a saúde do consumidor. Os frutooligossacarídeos estão também relacionados a atividades antioxidantes e à redução dos níveis de glicose no sangue (CAMPOS et al., 2012; SANTANA e CARDOSO, 2008; SILVA, 2007; FREITAS e JACKIX, 2005; AYBAR et al., 2001). Apesar de seus benefícios, o yacon possui tempo de vida útil muito pequeno em condições ambientes, de cerca de 7 dias, visto que os tecidos internos das raízes são muito delicados, o que predispõe o produto a sofrer rachaduras ou a romper-se facilmente durante a colheita, a embalagem e o transporte (MANRIQUE e PÁRRAGA, 2005).

Dentre os principais processos tecnológicos para a conservação de alimentos estão a conservação pelo calor ou frio, o uso de conservantes e anti-sépticos, a fermentação, a irradiação e o uso de processos combinados. Os processos de conservação dos alimentos baseiam-se na eliminação total ou parcial dos agentes que alteram os produtos ou na modificação ou supressão de um ou mais fatores essenciais, de modo que o meio se torne não-propício a qualquer manifestação vital. Todos esses processos podem ser aplicados em extremos de escalas de tecnologia e custos, com muito bons resultados (SINGH e HELDMAN, 1993).

Operações de desidratação e secagem são importantes nos processos de indústrias químicas e de alimentos, como também no armazenamento de grãos e

outros tipos de produtos biológicos. Produtos submetidos à secagem possuem maior conservação, devido à diminuição das taxas de reações degradativas, têm sua massa reduzida, facilitando o transporte e a estocagem, representam economia de energia, uma vez que não necessitam de refrigeração, e podem ter sabor, cor e aroma modificados. Contudo, a secagem convectiva utiliza temperaturas relativamente altas para que as taxas de transferência de umidade sejam elevadas e assim seja possível remover a umidade do produto em um curto período de tempo. Uma forma de minimizar a degradação térmica do produto, diminuindo a exposição às altas temperaturas, é reduzir seu teor de umidade inicial por meio da desidratação osmótica. Semelhante à desidratação clássica, este processo permite a concentração parcial do material celular de frutas e legumes, com um mínimo de prejuízo em relação ao uso de calor, por meio da imersão do produto em solução saturada de agente desidratante (LENART, 1996). Além disso, a desidratação osmótica resulta em ganhos de qualidade para o produto, em termos de intensificação do *flavor* e estabilidade da cor, melhora da textura e estabilidade de nutrientes durante o armazenamento (LAZARIDES, 1995; EL-AOUAR e MURR, 2003; RAOULT-WACK et al., 1994).

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para a aplicação da secagem osmo-convectiva, assim como se investigou a influência dos parâmetros de processo nos atributos de qualidade do produto final. Obteve-se com sucesso um produto com os atributos de qualidade desejados, em um processo relativamente simples e de médio custo.

Para se entender melhor o processo de secagem osmo-convectiva, é importante analisar este problema do ponto de vista físico, onde processos importantes relacionados à Mecânica dos Fluidos e à Transferência de Calor e de Massa ocorrem. Dada a complexidade dos fenômenos que tomam parte durante o processo, uma solução analítica das equações de balanço torna-se praticamente impossível. Assim, os trabalhos que vêm se desenvolvendo nesta área utilizam abordagens sobretudo empíricas, as quais, apesar de fornecerem importantes conclusões sobre o processo, oferecem resultados muito específicos para as condições em que o mesmo foi realizado. Os trabalhos numéricos, por sua vez, utilizam hipóteses simplificadas para viabilizar uma solução que seja validada pelos dados experimentais, tais como massa específica da solução osmótica e

tamanho da amostra constantes ao longo do processo, fatos que não são observados na prática. Vale ressaltar que, diferentemente do processo de secagem convectiva, cujo entendimento físico é bem consolidado, o processo de desidratação osmótica apresenta fluxos contracorrentes de massa, os quais oferecem significativa complexidade na área de modelagem. No presente trabalho, realizou-se a modelagem do processo de secagem osmo-convectiva do yacon utilizando-se uma abordagem teórica, baseada na solução das equações de Fourier e de Fick pelo Método dos Elementos Finitos. A partir do confronto dos dados numéricos com os experimentais, validou-se a modelagem proposta.

1.2 Justificativa

Existem muitos estudos a respeito do yacon na literatura, com relação à caracterização físico-química (MASSON et al., 2009; RIBEIRO, 2008; SILVA, 2007; CABELLO, 2005; GRAEFE et al., 2004; LACHMAN et al., 2004; MASSON e LIMA, 2003; SIMONOVSKA et al., 2003), à aplicação de tecnologias e adição na formulação de produtos alimentícios (SILVA, 2007; MASSON et al., 2007; MOSCATTO et al., 2006; MICHELS e MASSON, 2005; MASSON et al., 2004; MOSCATTO et al., 2004), aos potenciais nutricionais e benefícios à saúde (HONORÉ et al., 2012; CAMPOS et al., 2012; de MOURA et al., 2012; OJANSIVU et al., 2011; SANTANA e CARDOSO, 2008; SILVA, 2007; FREITAS e JACKIX, 2005; AYBAR et al., 2001), à utilização como substrato para extração de inulinase (CAZETTA et al., 2005) e aos processos de desidratação deste produto (REIS et al., 2012a; REIS et al., 2012b; KOTOVICZ, 2011; SCHER et al., 2009; BERNARDI et al., 2009; MALDONADO et al., 2008; VASQUES et al., 2005; MASSON et al., 2004; MOURA, 2004; MARANGONI et al., 2004; KURODA, 2001). Porém, há escassez de trabalhos sobre modelagem e otimização de processos de secagem do yacon, no sentido de minimizar o tempo de processo e possibilitar a máxima retenção da qualidade da matéria-prima. Moura (2004) utilizou redes neurais para a predição e a otimização do processo de secagem osmo-convectiva do yacon, contudo foi avaliada a influência das variáveis de processo apenas no conteúdo de umidade do produto. Kotovicz (2011) otimizou o processo de desidratação osmo-convectiva do yacon por meio da Metodologia de Superfície de Resposta.

Foram analisados os parâmetros perda de umidade, incorporação de sólidos e atividade de água das fatias de yacon durante a desidratação osmótica, tendo como variáveis independentes a temperatura e a concentração da solução de frutose e a utilização de revestimento com cobertura comestível de alginato de sódio.

Além disso, embora um vasto número de estudos tenha sido conduzido para analisar o processo de secagem de alimentos com pré-tratamento osmótico (IBITWAR et al., 2008; PAVKOV et al., 2009; GARCIA et al., 2008; PEKOSŁAWSKA e LENART, 2007; SHUKLA e SINGH, 2007; MASSON et al., 2004; BERNARDI et al., 2009; CALIARI et al., 2004; SAPATA et al., 2009; CORRÊA et al., 2008; ALAKALI et al., 2006), apenas uma fração destes (BORSATO et al., 2009; EL-AOUAR e MURR, 2003; MARQUES et al., 2007; SILVA et al., 2005; FLOURY et al., 2008) faz uso de simulação computacional. A importância dos modelos matemáticos está no potencial de predição do comportamento de secagem para um tipo de produto, determinando a influência de certos parâmetros na eficiência do processo, minimizando os custos de operação do sistema e a degradação dos nutrientes e atributos sensoriais do produto.

Neste trabalho, foram avaliados experimental e numericamente as variações de temperatura, umidade e absorção de sucralose do yacon submetido à secagem osmo-convectiva. A modelagem foi validada por meio da comparação entre dados experimentais e numéricos, cujos coeficientes de correlação foram altos ($R^2 > 0,94$). Sendo o modelo fenomenológico, isto é, teórico, é possível utilizá-lo para novas condições de processamento, em faixas de valores não estudadas experimentalmente. Como consequência, pode-se explorar as variáveis de processo de maneira a se obter o melhor produto com um mínimo consumo de energia, alcançando-se uma alta relação custo-benefício.

Em adição, se determinou experimentalmente algumas propriedades termofísicas do yacon e foram propostos modelos empíricos para calculá-las com base apenas no conteúdo de umidade do produto. Tal resultado é de significativa importância, visto que embora existam muitos dados sobre propriedades termofísicas de alimentos na literatura (ASHRAE, 2002; OKOS e CHOI, 1986; POLLEY et al.,

1980; MOHESNIN et al., 1980; QASHOU, 1973), nenhum deles é relacionado ao yacon.

Ao avaliar a influência das condições de operação da desidratação osmo-convectiva tanto na cinética de secagem quanto nos atributos de qualidade do yacon, este trabalho deve contribuir para o aperfeiçoamento do processo estudado, ao encontrar as melhores condições de operação, e auxiliará na valorização do yacon como produto e matéria-prima, facilitando e ampliando sua participação no mercado de alimentos funcionais.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como foco o estudo do processo de secagem osmo-convectiva do yacon, bem como a modelagem matemática da transferência conjugada de calor e de massa. Para cumprir os objetivos gerais, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação da composição centesimal e do conteúdo de frutooligossacarídeos e açúcares livres do yacon *in natura* e após a secagem osmo-convectiva;
- Determinação experimental das variações de temperatura, umidade e encolhimento na secagem osmo-convectiva e da absorção de sucralose na desidratação osmótica;
- Avaliação da secagem osmo-convectiva com relação à influência das variáveis de processo na perda de água e ganho de sólidos e em alguns atributos de qualidade do yacon, como encolhimento, mudança de cor e concentração de sólidos solúveis;
- Comparação do produto desidratado com e sem a aplicação do pré-tratamento osmótico em termos de integridade estrutural, encolhimento e mudança de cor;

- Determinação experimental de propriedades termofísicas do yacon durante a secagem osmo-convectiva e ajuste de modelos empíricos para descrição destas propriedades;
- Desenvolvimento de um modelo teórico para a secagem osmo-convectiva do yacon que contemple os fenômenos de transferência de massa (água e sucralose) e de transferência de calor.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Yacon

2.1.1 Origem e caracterização

O yacon é uma planta de origem andina, cujo cultivo remonta às culturas pré-incas. Dá-se o nome de yacon à planta e à sua raiz de reserva. De maneira geral o termo yacon é o mais utilizado para esta raiz tuberosa, embora nomes como *aymara*, na Bolívia, *jicama*, no Equador, *arboloco*, na Colômbia, *poire de terre*, na França, yacon *strawberry*, nos Estados Unidos e *polimnia*, na Itália, sejam também usados (GRAU e REA, 1997).

Sendo originário dos Andes, região herbácea, de clima temperado, o yacon desenvolve-se desde a Colômbia e a Venezuela até o noroeste da Argentina, em altitudes que variam de 2000 a 3400 metros. Devido às altas altitudes de sua região de origem, a planta tolera baixas temperaturas e prefere solos aerados, soltos e arenoso-argilosos, com pH ao redor de 6 (HERMANN e FREIRE, 1998). No entanto, de acordo com Grau e Rea (1997), o yacon é adaptável a uma extensa gama de climas e solos e apresenta alta produtividade.

Até os anos 80, o yacon era cultivado apenas em escala doméstica, predominantemente na região dos Andes, porém o conhecimento recente de suas propriedades promissoras tem provocado intenso crescimento na produção, tendo este produto atingido os centros urbanos. Entre os anos 60 e 80, o yacon foi levado para países como Japão, Nova Zelândia, Tailândia, Estados Unidos e Brasil, neste último trazido por agricultores de origem nipônica da região de Capão Bonito. Atualmente, o yacon é cultivado em muitos países além do Brasil, tais como Paraguai, Estados Unidos, Eslováquia, China, Coreia e Taiwan (LACHMAN et al., 2004).

Do ponto de vista botânico, a planta faz parte da família *Asteraceae*, contudo existem algumas controvérsias a respeito de seu nome científico. Segundo Grau e Rea (1997), originalmente o yacon foi classificado como pertencente ao gênero *Polymnia*, em 1751. Mais tarde, em 1978, determinou-se que muitas das espécies do gênero *Polymnia*, dentre as quais se encontrava o

yacon, na realidade pertenciam ao gênero *Smallanthus* (SEMINARIO et al., 2003). De acordo com GRAU e REA (1997), existem diferenças importantes entre os gêneros *Polymnia* e *Smallanthus*, com relação ao padrão de estrias na superfície do fruto, ausência de glândulas no apêndice da antera, dentre outros. Portanto, apesar de muitos autores referirem-se ao yacon como parte do gênero *Polymnia*, o ponto de vista de Robinson vem ganhando aceitação (SANTANA e CARDOSO, 2008).

De acordo com Seminario et al. (2003), a planta de yacon é herbácea e perene, mede de 1 a 2,5 metros de altura e consta de um talo principal, às vezes ramificado desde a base, outras vezes apenas com ramos pequenos em sua parte superior (Fig. 2.1a). Os talos são cilíndricos e ocos, de cor verde a púrpura. A planta contém inflorescências (Fig. 2.1) e folhas triangulares, de base truncada ou rastiforme (Fig. 2.1c). O yacon possui dois tipos de raízes (Fig. 2.1d): as fibrosas, que são muito delgadas e cuja função é a fixação da planta ao solo e a absorção de água e nutrientes, e as de reserva, as quais são grossas, fusiformes ou ovaladas, de cor branca, creme ou púrpura. Visualmente, a raiz tuberosa de yacon é semelhante às batatas doces (Fig. 2.2), contudo possui polpa crocante e sabor doce, similar ao o da pêra. As raízes possuem entre 5 e 10 cm de diâmetro, comprimento de 12 a 20 cm e peso que varia entre 120 e 1200 g. Tradicionalmente, o yacon é consumido como fruta fresca ou desidratada em diferentes graus.

O yacon apresenta alta produtividade, atingindo um rendimento de raízes entre 10 e 100 toneladas por hectare, dependendo do país e local de cultivo. A planta produz entre 200 e 350 folhas até a floração, o que rende uma produção de 3 a 4 toneladas de folha seca por hectare, as quais são utilizadas para a fabricação de chá. A secagem das folhas deve ser feita até se atingir o conteúdo de umidade de cerca de 5%, em secador de bandejas ou em meio ambiente, desde que a umidade relativa do ar seja baixa. Na atualidade, o Brasil e o Japão são os países que produzem a maior quantidade de chá de yacon. O Japão é responsável pela maior quantidade de pesquisas científicas relacionadas ao manejo agrônomo, composição química, benefícios à saúde e desenvolvimento de produtos procesados de yacon, embora o Brasil também tenha alcançado avanços importantes na investigação destes temas (SEMINARIO et al., 2003).

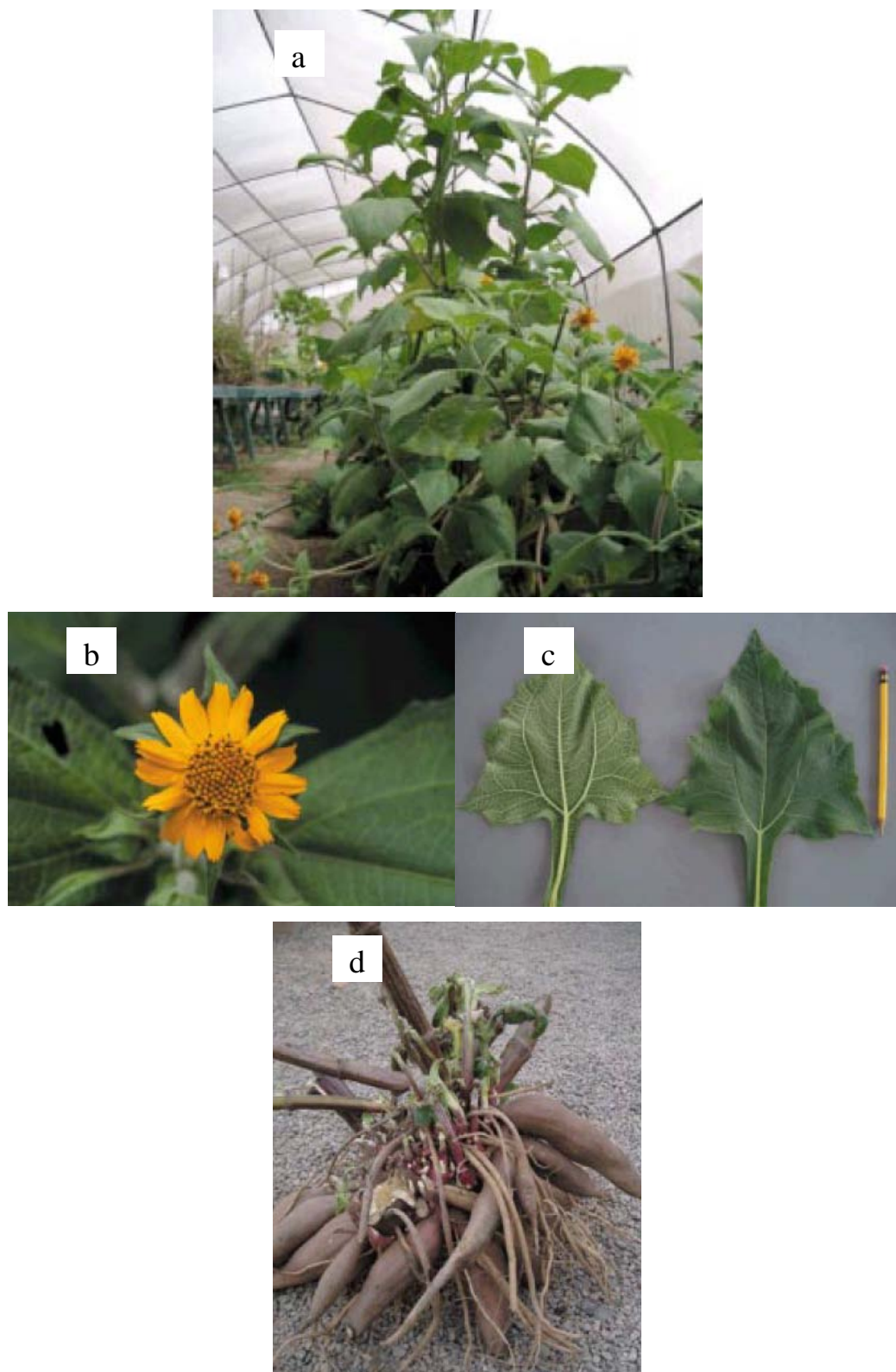


Figura 2.1 – Detalhes da planta de yacon: (a) partes aéreas e subterrâneas; (b) inflorescências; (c) folhas; (d) cepa e raízes tuberosas. (Fonte: SEMINÁRIO et al., 2003).

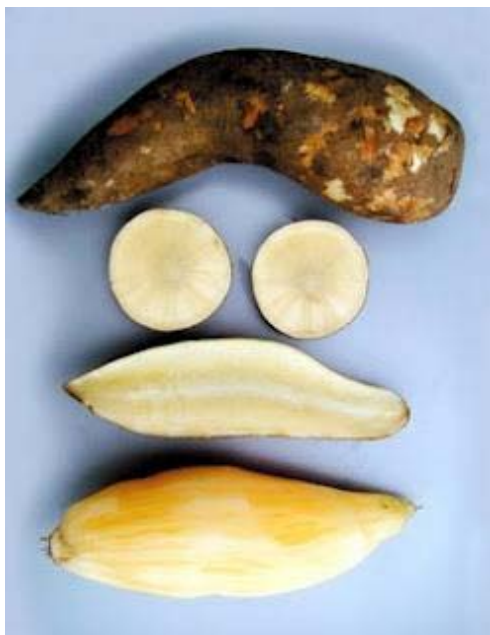


Figura 2.2 – Yacon *in natura*.

A composição do yacon é em grande parte referente a água e carboidratos. O percentual de água das raízes situa-se entre 83 e 90%, o que lhes confere grande poder reidratante. Devido ao alto conteúdo de água, o valor energético da raiz é baixo (LACHMAN et al., 2004) e seu tempo de vida útil em condições ambientais é pequeno, cerca de 7 dias, visto que os tecidos internos das raízes são muito delicados, o que predispõe o produto a sofrer rachaduras ou a romper-se facilmente durante a colheita, a embalagem e o transporte (MANRIQUE e PÁRRAGA, 2005). Embora a composição relativa dos diferentes açúcares varie significativamente devido a fatores como o cultivar, a época de plantio e colheita e o tempo e temperatura de pós-colheita (SEMINARIO e VALDERRAMA, 2003), pode-se considerar a seguinte composição em base seca: 40 a 70% de FOS, 5 a 15% de sacarose, 5 a 15% de frutose e menos de 5% de glicose (MANRIQUE e PÁRRAGA, 2005), além de traços de amido (GRAU e REA, 1997).

O conteúdo de proteínas, lipídios, vitaminas e minerais das raízes é bastante baixo (SEMINARIO e VALDERRAMA, 2003). O mineral mais abundante é o potássio, que existe em quantidades significativas e representa, em média, 230 mg a cada 100 g de matéria fresca comestível ou de 1 a 2% do peso seco. Em menores quantidades são encontrados cálcio, fósforo, magnésio, sódio, ferro, zinco, manganês e cobre (MANRIQUE e PÁRRAGA, 2005). Algumas vitaminas

encontradas no yacon geralmente representam elementos traço na composição, exceto o ácido ascórbico. Entre elas estão o retinol, o caroteno, a tiamina, a riboflavina e a niacina. De acordo com Lachman et al.(2003) as vitaminas B1, B2, C, caroteno e polifenóis são encontradas no yacon nas quantidades de 0,07 mg, 0,31 mg, 5,00 mg, 0,13 mg e 203,00 mg, respectivamente, considerando como base 100g de produto úmido. Outro composto noticiado na composição do yacon é o triptofano, existente em quantidades médias de $140 \mu\text{g g}^{-1}$ (TAKENAKA, 2003; VALENTOVÁ e ULRICHOVÁ, 2003). A Tabela 2.1 apresenta a composição média das raízes de yacon, a qual, segundo Hermann e Freire (1998), pode mudar em função do plantio.

Tabela 2.1 – Composição centesimal do yacon *in natura* em base úmida.

Componente	Composição (%)
Água	88,64-91,20
Carboidratos	8,90-12,70
Cinzas	0,43-0,60
Proteínas	0,27-0,37
Fibras	0,31-0,41
Lipídios	0,01-0,05
Sólidos solúveis (°Brix)	9,00-12,60
Açúcares totais (g)	18,00-42,00

Os FOS pertencem a uma classe particular de açúcares conhecidos por frutanos. A estrutura fundamental dos frutanos é um esqueleto de unidades de frutose unidas entre si por ligações glicosídicas β (2 \rightarrow 1) e/ou β (2 \rightarrow 6), contendo uma unidade de glicose terminal, ou seja, os frutanos possuem uma molécula de sacarose associada a 30 a 50 moléculas de frutose. Devido às moléculas de frutose se unirem exclusivamente por ligações β (2 \rightarrow 1), estes frutanos adquirem uma conformação espacial semelhante a cadeias lineares. Existem diversos tipos de frutanos na natureza, mas do ponto de vista nutricional e da indústria de alimentos, reconhecem-se os FOS e a inulina como os mais importantes (SEMINARIO et al., 2004). A inulina e os FOS não têm uma composição química definida já que ambos são uma mistura de frutanos de diferentes tamanhos. Para

Gibson e Roberfroid (1995), as inulinas são frutanos cujas ligações $\rightarrow 1$ possuem grau de polimerização entre 2 e 60 unidades, sendo que os frutanos de cadeia curta com grau de polimerização de 2 até 20 unidades são conhecidas como FOS, cuja fórmula estrutural é ilustrada na Fig. 2.3. Portanto, os FOS são um tipo de inulina.

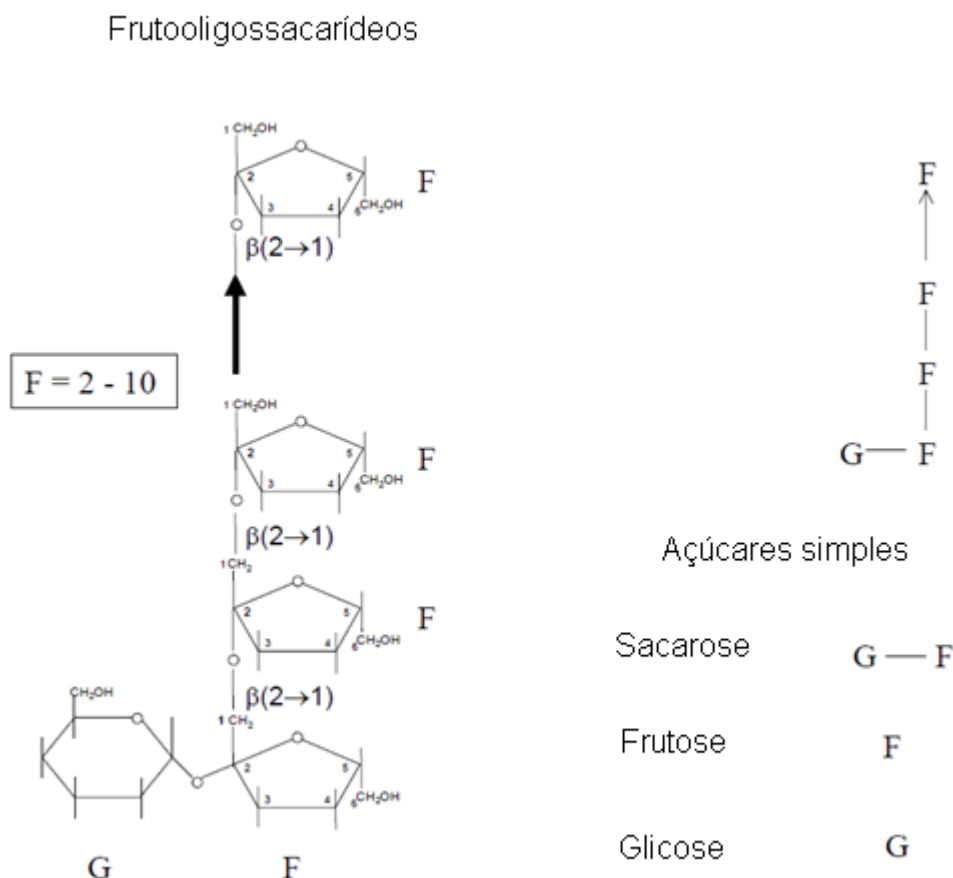


Figura 2.3 – Fórmula estrutural das moléculas de FOS.

Segundo Seminário e Valderrama (2003), é importante distinguir a diferença entre os conceitos de inulina e FOS já que as propriedades físicas e suas aplicações em processos da indústria de alimentos são bastante diferentes. A inulina quase não tem sabor doce, sua consistência especial e sua baixa solubilidade relativa em água a convertem em um substituto excelente da gordura para a elaboração de produtos como sorvetes. Os FOS são muito solúveis em água, têm ligeiro sabor doce (entre 30 e 50% do poder adoçante da sacarose) e podem ser utilizados como substitutos hipocalóricos do açúcar comum. Apesar

disso, a inulina e os FOS geram quase o mesmo efeito fisiológico nos consumidores: proporcionam somente $\frac{1}{4}$ do valor calórico dos carboidratos comuns, são conhecidos como fibras dietéticas e são empregados como insumos para a elaboração de alimentos funcionais e nutracêuticos. A inulina é encontrada em muitas plantas como a cebola, o alho e a chicória, e os FOS se encontram nestas plantas, mas em quantidades muito pequenas. No yacon não existe inulina e o açúcar predominante são os FOS.

2.1.2 Potenciais nutricionais do yacon e formas de consumo

O grande diferencial do yacon em relação aos outros tubérculos diz respeito ao armazenamento de energia, que não se dá na forma de amido, e sim na forma de frutooligossacarídeos, compostos cujos monômeros que os compõem não podem ser decompostos no organismo humano devido à ausência de enzimas necessárias para seu metabolismo (ALFARO e MELGAREJO, 2005). Enquanto os outros tubérculos absorvem os açúcares comuns em forma de glicose no intestino delgado, os FOS passam diretamente ao cólon e são completamente fermentados até formar ácidos graxos de cadeia curta. Assim, o consumo de FOS não tem incidência nos níveis de glicose sanguíneos. Seu consumo freqüente pode diminuir significativamente o conteúdo de triglicerídeos no sangue. Além disso, os FOS são considerados prebióticos, pois estimulam seletivamente o crescimento de bifidobactérias na microbiota do cólon. Atuando como fibra alimentar, os FOS levam à melhora das funções intestinais, indicando atividade preventiva de câncer nesta região (HARTEMINK et al., 1997). O equilíbrio produzido na flora gastrointestinal pelo consumo de FOS estimula outros benefícios no metabolismo humano, como a redução da pressão sanguínea em pessoas hipertensas, a alteração do metabolismo de ácidos gástricos, a redução da absorção de carboidratos e lipídeos, normalizando a pressão sanguínea e os lipídeos séricos, e a melhora do metabolismo de diabéticos (YAMASHITA et al., 1984, SPIEGEL et al., 1994). Segundo Yamashita et al. (1984), os FOS podem ter efeito positivo em portadores de diabetes tipo 2, cujos parâmetros sanguíneos em relação a colesterol e índice glicêmico

melhoraram significativamente depois de sujeitos a uma dieta com FOS por vários dias.

Além dos benefícios relacionados ao conteúdo de FOS, o yacon possui potencial no uso em dietas hipocalóricas, devido ao seu alto teor de água e baixo valor energético, e na prevenção de fadiga e câibras em função de seu elevado conteúdo de potássio (SEMINARIO et al., 2003).

Como os FOS não são degradados durante a maioria dos processos de aquecimento, embora possam ser hidrolisados em frutose em condições muito ácidas e em condições de exposição prolongada a determinados binômios tempo/temperatura (BORNET, 1994; YUN, 1996), o yacon pode ser usado em formulações de iogurtes, sorvetes e sobremesas lácteas, em produtos de panificação, sob a forma de farinha (Fig. 2.4a), em sucos e néctares frescos, produtos de confeitaria e molhos sem grande prejuízo nutricional. Além da forma de chips desidratados (Fig. 2.4b), o yacon pode ser consumido na forma de chá e de suco (Figs. 2.4c e 2.4d), muitas vezes combinado com suco de limão ou laranja, os quais controlam seu escurecimento. Está se difundindo também seu consumo na forma de purê, que é muito parecido em sabor com o purê de maçã, e na forma de fruta seca, com 14 a 16% de umidade, a qual possui sabor doce e pode ser consumida diretamente ou em produtos de confeitaria (SEMINARIO et al., 2004). Outra forma de consumo é o xarope de yacon (Fig. 2.4e), concentrado doce que se obtém ao evaporar água do suco de yacon até 70% de concentração de sólidos solúveis. Devido ao xarope possuir principalmente frutooligossacarídeos, seu conteúdo calórico é menor do que outros edulcorantes similares, como o xarope de *maple* e o mel de abelha, e pode atuar como um substituto hipocalórico destes edulcorantes, com a vantagem de ser um produto nutracêutico. O xarope de alta frutose é obtido pela hidrólise completa dos FOS até convertê-los em frutose e glicose, por hidrólise ácida ou enzimática (GARCIA, 2000). No Brasil, Marangoni (2004) transformou o yacon em farinha e compôs formulações de bolos, biscoitos e snacks de arroz. Masson et al. (2009) formularam um doce dietético misto de yacon e maracujá, obtendo alto índice de aceitabilidade. Produtos como cereal matinal contendo yacon (Fig. 2.4f), pasta de yacon com chocolate (Fig. 2.4g), além de yacon em forma de cápsulas (Fig. 2.4h) ou extrato em gotas (Fig. 2.4i) também são comercializados.



Figura 2.4 – Produtos derivados do yacon: (a) yacon em pó; (b) chips (fatias desidratadas); (c) chá de folhas de yacon; (d) suco; (e) xarope; (f) cereal matinal; (g) pasta de yacon com chocolate; (h) yacon em cápsulas; (i) extrato de yacon em gotas.

Como todos os carboidratos do yacon, incluindo os oligofrutanos, podem ser rapidamente metabolizados por ruminantes, suas raízes podem ainda ser usadas para alimentar gado e ovelhas, com os mesmos efeitos prebióticos (STRICKLING, 2000). Estudos como o de Hondo et al. (2000) indicam a possibilidade de produzir vinagre de yacon contendo FOS naturais.

2.1.3 Aspectos tecnológicos do processamento do yacon

O yacon é um tubérculo com alto teor de umidade, o que o torna extremamente suscetível a reações de degradação microbiológica e enzimática. As enzimas mais importantes na deterioração do yacon são a peroxidase (POD) e a polifenoloxidase (PPO), as quais utilizam como substrato alguns compostos nele presentes, tais como o aminoácido L-triptofano, os taninos e os compostos fenólicos, principalmente o ácido clorogênico. A POD é considerada a enzima vegetal mais estável ao calor e sua inativação tem sido usada como indicador de adequação de branqueamento. A PPO, por sua vez, promove a oxidação enzimática de compostos fenólicos a quinonas que, após polimerização, apresentam os típicos pigmentos marrons ou pretos conhecidos da oxidação enzimática de frutas e vegetais (VALENTOVÁ e ULRICHOVÁ, 2003).

Durante a estocagem do yacon, ocorre uma série de reações oxidativas, as quais utilizam peróxido de hidrogênio como substrato ou oxigênio como aceptor de hidrogênio. Segundo Butler e Rivera (2004), durante o descascamento, quando as membranas das células são rompidas, os polifenóis e os taninos misturam-se às enzimas citoplasmáticas, causando a oxidação enzimática e tornando a epiderme escura. Esta oxidação se dá em presença de oxigênio livre, prejudicando a aparência do yacon e a de seus produtos (VALENTOVÁ e ULRICHOVÁ, 2003). Deste modo, a exposição ao ar da superfície recém-cortada das raízes deve ser minimizada antes do processamento.

Além da degradação enzimática, também ocorrem mudanças na composição dos carboidratos do yacon. Segundo Graefe et al. (2004), os FOS tendem a se despolimerizar em sacarose e açúcares redutores, como glicose e frutose, muito rapidamente após a colheita, sobretudo quando o produto é mantido fora de refrigeração, sendo a taxa de reação de despolimerização acelerada com o tempo e com o aumento da temperatura de armazenagem.

Dado o exposto, o controle das reações de degradação enzimática e microbiológica, assim como das reações de despolimerização dos FOS, pode ser realizado por meio da redução do teor de umidade do yacon, do armazenamento em baixas temperaturas, da eliminação do oxigênio do meio ou minimização da

exposição do yacon descascado ao ar ambiente, e da utilização de agentes químicos antioxidantes.

O processamento mais utilizado para o yacon é a desidratação, já que os principais usos da raiz são na forma de produto desidratado, transformado ou não em pó. A secagem é uma importante alternativa para a remoção de água e substâncias voláteis de um produto sólido, diminuindo sua atividade de água, e, conseqüentemente, inibindo a ação dos microorganismos deteriorantes e das óxido-redutases, tendo ainda algumas decorrências importantes, como a diminuição de volume, implicando na redução de custos com transporte, embalagem e estocagem dos produtos obtidos. A desidratação convectiva é considerada um dos métodos mais simples e econômicos para comercializar frutas e verduras e envolve a transferência simultânea de calor e massa, onde calor é transferido para o produto, ao mesmo tempo em que umidade é removida na forma de vapor para uma fase gasosa insaturada (PARK et al., 2001). No caso do yacon, os principais fatores limitantes para o uso de temperaturas elevadas são a despolimerização dos FOS, resultando em perda de valor nutricional, o escurecimento não-enzimático proveniente da reação de caramelização, e o aumento da intensidade do pigmento formado durante a possível degradação enzimática no pré-processamento. Segundo Araújo (2004), a temperatura afeta a composição do pigmento formado, aumentando o teor de carbono, e, portanto, a sua intensidade. Assim, é necessário usar temperaturas amenas durante o processo de secagem, de até 80°C, ou então diminuir o tempo de processo por meio da redução prévia do conteúdo de umidade do produto. Uma alternativa é a aplicação de um pré-tratamento osmótico, que permite a concentração parcial do material celular de frutas e legumes, minimizando os efeitos da temperatura na qualidade dos alimentos desidratados.

Kuroda (1991) obteve farinha de yacon a partir de raízes tuberosas descascadas, secas em estufa e trituradas. Masson et al. (2004) estudaram a secagem convectiva do yacon, com e sem pré-tratamento osmótico, comparando o produto obtido pelos dois processamentos. O pré-tratamento osmótico diminuiu o tempo de secagem e acentuou a cor do produto seco. Segundo os autores, a influência do pré-tratamento na cor pode ser explicada pela maior concentração do produto após a secagem. Marangoni et al. (2004) estudaram a viabilidade de

dois processos de secagem, atomização e liofilização, para a produção de extrato de yacon em pó. O produto obtido por atomização apresentou índice de molhamento e taxa de dissolução maiores que o pó liofilizado, demonstrando as melhores propriedades de instantaneidade do extrato em pó de yacon.

No intuito de diminuir ou evitar a atividade enzimática no yacon, tratamentos com agentes químicos ou como o branqueamento têm sido usados previamente à secagem convectiva. Em estudo realizado por Scher et al. (2009), foi avaliado o comportamento de secagem do yacon com e sem branqueamento a vapor. A secagem utilizou as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C e teve duração de 5,5 horas. A maior temperatura proporcionou o menor tempo de secagem, e menores valores de atividade de água foram atingidos por amostras tratadas com branqueamento, em todas as temperaturas de secagem utilizadas. Além disso, o yacon sem branqueamento mostrou concentrações mais baixas de açúcares redutores quando desidratado a 70°C, em comparação com as amostras secas às temperaturas mais baixas, o que indica hidrólise dos FOS a 70°C. Em experimento de Rivera e Manrique (2005) para processamento de sumo de yacon, foram utilizados 1,3 g de ácido ascórbico para cada quilograma de extrato de raízes descascadas passadas por centrífuga a fim de controlar o escurecimento da amostra. Obtiveram-se resultados satisfatórios. Padilha et al. (2009) avaliaram o emprego dos agentes químicos cloreto de cálcio e metabissulfito de potássio no processamento de yacon, para obtenção de farinha, a fim de inibir o escurecimento enzimático do produto e favorecer o tempo de secagem. As amostras foram secas a 55°C em estufa ventilada. Apesar de não inibir totalmente a atividade das enzimas peroxidase e polifenoloxidase, o experimento que utilizou o metabissulfito propiciou menor tempo de secagem e melhor firmeza da matéria-prima.

2.2 Processo de desidratação osmótica

2.2.1 Fundamentos

A desidratação osmótica, também conhecida como desidratação por imersão-impregnação, consiste na imersão de produtos inteiros ou em fatias, sob

diferentes geometrias e espessuras, em uma solução saturada de agente desidratante (Fig. 2.5). Da diferença de pressão de vapor entre o alimento e a solução, decorre o fluxo de água do alimento para a solução e o fluxo de sólidos da solução para o produto.

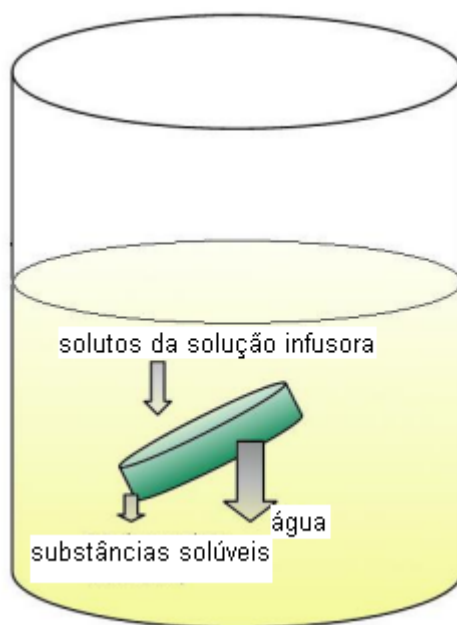


Figura 2.5 – Transferência de massa no processo de desidratação osmótica
(Fonte: DEMCZUK JÚNIOR, 2007).

Segundo Torreggiani (1993), a perda de água é acompanhada por incorporação de sólidos como consequência das trocas difusionais que ocorrem durante o processo, devido aos gradientes de concentração. Ocorre ainda a lixiviação de compostos naturais do alimento, tais como vitaminas, minerais, ácidos orgânicos, açúcares redutores, compostos aromáticos e pigmentos, já que a membrana celular responsável pelo transporte osmótico não é perfeitamente seletiva (LERICI et al., 1985), o que afeta as características sensoriais e nutricionais do produto.

Segundo Shi e Le Maguer (2009), a saída de água e a entrada de solutos ocorre principalmente nas primeiras duas a três horas de imersão. Depois disso, a diferença de concentração entre o alimento e a solução diminui, até que o sistema atinja o equilíbrio. Os mecanismos de transporte que tomam parte na desidratação osmótica são influenciados por diversos fatores, tais como o tipo, a

concentração e a temperatura da solução desidratante, o tempo de imersão, a proporção produto-solução, a agitação, e ainda as características do tecido vegetal, próprias de cada produto. Como a remoção de água durante este processo ocorre apenas pelo fenômeno da osmose através das membranas celulares do vegetal, não há necessidade de mudança de fase, tornando-o um método eficiente, não-destrutivo e de baixa demanda energética.

A desidratação osmótica resulta em ganhos de qualidade para o produto, em termos de intensificação do *flavor* e estabilidade da cor, melhora da textura e estabilidade de nutrientes durante o armazenamento (LAZARIDES et al., 1995; EL-AOUAR e MURR, 2003; RAOULT-WACK et al., 1994). Outra vantagem deste processo é o tempo de vida útil do produto, que apresenta boa estabilidade microbiológica por até 180 dias, com adequada aceitabilidade sensorial durante todo o período de armazenamento (LIMA et al., 2004). A desidratação osmótica é uma alternativa barata, acessível e eficiente para transformação de matérias-primas agroindustriais em produtos de maior valor agregado, e requer menos energia em comparação com os métodos tradicionais de secagem convectiva. Contudo, geralmente não fornece um produto com umidade suficientemente baixa para ser considerado estável em prateleira sob temperatura ambiente. Portanto, é freqüentemente utilizada como uma etapa anterior a outros processos de desidratação, como liofilização, secagem a ar quente, secagem a vácuo e microondas (MASTRANGELO et al., 2000; BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000). Segundo Torreggiani (1993), a desidratação osmótica pode ser usada como pré-tratamento à secagem convectiva para melhorar as propriedades nutricionais, sensoriais e funcionais de um produto sem modificar sua integridade. O uso do pré-tratamento osmótico em um processo de congelamento diminui o escurecimento enzimático (CONVAY et al., 1983) e reduz o colapso estrutural e a perda de água durante o descongelamento (FORNI et al., 1990). A desidratação osmótica antes da fritura desidrata parcialmente os materiais, ocasionando efeitos positivos sobre os fenômenos de absorção de óleo, perda de água e mudanças na cor e na estrutura (KROKIDA et al., 2001).

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos a respeito da aplicação da desidratação osmótica em alimentos. Alguns a utilizam como tratamento principal, como no caso de desidratação de jenipapo, abacaxi, mamão, banana nanica,

banana da terra, pêra e carambola (ANDRADE et al., 2003; BORSATO et al., 2009; EL-AOUAR e MURR, 2003; CALIARI et al., 2004; ERTEKIN e CAKALOZ, 1996; SILVA et al., 2005); outros a utilizam como etapa prévia a diversos métodos de desidratação, geralmente a secagem convectiva (CORRÊA et al., 2008; GONÇALVES e BLUME, 2008; MARQUES et al., 2007; IBITWAR et al., 2008; PAVKOV et al., 2009; GARCIA et al., 2008; MASSON et al., 2004; BERNARDI et al., 2009; SAPATA et al., 2009; QUEIROZ et al., 2007). Tais trabalhos lidam com o estudo do mecanismo do processo, do efeito das variáveis de operação na velocidade do processo e da modelagem de ganho de sólidos e perda de água. Como a desidratação osmótica é por natureza um processo lento, muitos pesquisadores dedicam-se a aumentar as taxas de transferência de massa. As técnicas para tanto são a aplicação de pressão hidrostática ultra alta (RASTOGI et al., 2007) ou pulsos de campo elétrico de alta intensidade (RASTOGI et al., 2002) antes da desidratação osmótica, e aplicação de ultrassom (SIMAL et al., 1998), vácuo parcial (FITO, 2001) ou força centrífuga (AZUARA et al., 1992) durante ou antes do tratamento osmótico. A aplicação de alta pressão modifica a estrutura da parede celular e a arquitetura da membrana, tornando as células mais permeáveis (RASTOGI et al., 2007). O tratamento com campo elétrico pulsado de alta intensidade resulta em um aumento na permeabilidade das células vegetais devido ao dano causado às células, ocasionando o amolecimento dos tecidos e, portanto, aumentando a permeabilidade das membranas (RASTOGI et al., 2002). Em um meio sólido, as ondas sonoras causam rápidas e sucessivas compressões e rarefações, aumentando a velocidade dos processos em que ocorre a difusão (FLOROUS e LIANG, 1994), sendo importante em processos de secagem de alimentos. A irradiação gama, por sua vez, modifica a estrutura tecidual, aumentando a permeabilidade das células vegetais e a transferência de massa durante a desidratação osmótica (WANG e CHAO, 2002; RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004). Segundo Fito (2001), quando realizada sob vácuo, a desidratação osmótica é mais rápida que quando sob pressão ambiente, devido ao gradiente de pressão e fluxo capilar e devido ao transporte osmótico difusivo, porém o vácuo aplicado afeta apenas a taxa em que o equilíbrio é atingido, e não o conteúdo de umidade de equilíbrio em que isto acontece. O efeito da força centrífuga durante a desidratação osmótica de cenouras foi

estudado por Azuara et al. (1992), que obtiveram um aumento na transferência de massa de 15% para a perda de água e 80% para o ganho de sólidos.

Todavia, apesar da crescente preocupação com o estudo e a otimização dos problemas de desidratação osmótica em alimentos, suas aplicações industriais ainda são limitadas. Segundo Lazarides et al. (1995) e Raoult-Wack et al. (1994), as razões para isto estão nos problemas associados às dificuldades para controlar o elevado ganho de solutos pelo material e a reciclagem e estabilidade microbiana das soluções osmóticas. De acordo com Rastogi et al. (2002), para tornar a desidratação osmótica mais atrativa em termos econômicos, a solução osmótica necessita ser reconcentrada por algum meio, já que durante o processo a solução torna-se diluída e adquire sabor e cor. A reconcentração pode ser feita por evaporação, por adição de reagente osmótico fresco ou por concentração por membranas. O processo de separação de membranas é preferido porque não envolve mudança de fases, como ocorre durante a evaporação. O principal problema durante o tratamento térmico é o escurecimento (caramelização e reação de Maillard) já que alguns aminoácidos ou proteínas podem ter sido extraídos do alimento. A viabilidade econômica de um processo de desidratação osmótica envolve também o custo do agente osmótico e do descarte da solução osmótica. Outra limitação do processo é a alta viscosidade da solução osmótica, o que aumenta a resistência à transferência de massa, uma vez que o coeficiente de difusão é inversamente proporcional à viscosidade do sistema (WILKE e CHANG, 1955). A natureza lábil dos alimentos também não permite um aumento nos níveis de agitação além de um ponto que ultrapasse o efeito da viscosidade. A baixa diferença de densidade faz com que o produto flutue, requerendo um meio mecânico adicional para mantê-lo imerso na solução.

2.2.2 Efeito das variáveis de processo

Os parâmetros que influenciam a transferência de massa durante a desidratação osmótica podem ser sumarizados como: concentração e temperatura da solução osmótica, agitação, razão produto-solução, estrutura do alimento (porosidade), formato e tamanho (os quais determinam a área superficial

e a resistência à transferência de massa), a natureza e o peso molecular do soluto osmótico e a pressão (alta, ambiente ou vácuo).

Sendo a cinética de desidratação osmótica dependente das variáveis de processo, tem sido feito grande esforço na análise de sua influência no tempo de processo e na qualidade do produto obtido. Estudos mostram que a taxa de desidratação osmótica é acelerada mediante aumento na concentração e na temperatura da solução osmótica (SHUKLA e SINGH, 2007; LOMBARD et al., 2008; ISPIR e TOGRUL, 2009). Durante a desidratação osmótica de bananas em solução de sacarose em concentrações de 45, 55 e 65°Brix, Rastogi et al. (1997) observaram que a concentração influenciou positivamente no transporte de massa. A perda de água do produto variou entre 18,71% e 33,14% e o ganho de sólidos variou entre 4,74% e 14,69%, para as concentrações utilizadas. Segundo Eren e Kaymak-Ertekin (2007), durante a desidratação osmótica de batatas, usando concentrações de solução binária de sacarose (40% m/m a 60% m/m) e sal (0% (m/m) a 15% m/m), 54% de concentração de sacarose e 15% de sal foi o ponto ótimo para a máxima perda de umidade e mínimo ganho de sólidos. Souza Neto et al. (2005), durante a desidratação osmótica de manga, observaram que a concentração inicial de sacarose no xarope osmótico promoveu aumento na taxa de perda de água durante o processo, na faixa de 55°Brix a 65° Brix, devido ao aumento na pressão osmótica no exterior da fruta. Porém, o uso de xaropes mais concentrados, apesar de ter intensificado a perda de água, apresentou o inconveniente aumento do ganho de sólidos. Segundo Torreggiani (1993), na desidratação osmótica a perda de água é acompanhada por incorporação de sólidos como consequência das trocas difusionais que ocorrem durante o processo, devido aos gradientes de concentração.

A razão sólido-solução osmótica é outro fator de importância. O aumento na razão de massa sólido-solução, na faixa de 1:4 a 1:20, assegura uma força motriz mais uniforme para a transferência de massa (RASTOGI et al., 2005; ISPIR e TOGRUL, 2009). Souza et al. (2003) estudaram a desidratação osmótica de bananas usando proporções fruta-xarope de sacarose de 1:2 e 1:4 e encontraram que a maior proporção acelerou o transporte de massa.

A natureza e a massa molecular do soluto osmótico também são fatores importantes (EL-AOUAR et al., 2006). Quanto menores o peso molecular do

soluto e a viscosidade da solução, maiores são a perda de água, a redução de peso e o ganho de sólidos. Portanto, utilizam-se solutos de alto peso molecular quando se requer grande perda de água, enquanto que se usam soluções com baixa concentração e soluto de baixo peso molecular no caso de adoçamento, quando se necessita de alto ganho de sólidos (RASTOGI et al., 2005). Agentes osmóticos comumente utilizados são a sacarose, a frutose, o cloreto de sódio, edulcorantes como sucralose e sorbitol, ou ainda combinações destes agentes, em soluções binárias ou ternárias (GERALDO et al., 2003; PAVKOV et al., 2009; MOURA, 2004; SILVA FILHO et al., 2007). Qualquer soluto ou solvente muito solúvel que seja miscível com água pode ser utilizado como agente osmótico (RAOULT-WACK et al., 1994).

Outro fator determinante na transferência de massa durante a desidratação osmótica é o formato e o tamanho das amostras, os quais determinam a área superficial e a resistência à transferência de massa. Menores espessuras promovem maior taxa de transferência de massa. Lerici et al. (1985) submeteram maçãs cortadas em formato de anéis, cubos, fatias e palitos à desidratação osmótica. A perda de peso e o ganho de sólidos aumentaram em proporção à razão entre área superficial e comprimento característico. A taxa de desidratação osmótica também é favorecida pela agitação, devido ao aumento da turbulência, a qual acelera a transferência de massa. Um nível adequado de agitação garante a redução ou eliminação da resistência de transferência de massa lateral e provoca uma força motriz constante (RASTOGI et al., 2005). Pode-se citar ainda como fator de influência na desidratação osmótica, a pressão da solução (alta pressão, pressão ambiente ou vácuo): maiores pressões aumentam as taxas de transferência de massa (LOMBARD et al., 2008).

2.3 Processo de secagem convectiva

2.3.1 Fundamentos

A secagem é uma operação unitária que pode ser definida como a aplicação de calor sob condições controladas para remover a maior parte da água presente em um produto por evaporação. O maior objetivo da desidratação em

alimentos é aumentar o seu tempo de prateleira devido à redução da atividade de água. Isto inibirá o crescimento microbiano assim como a atividade enzimática, os quais são indesejáveis. Como vantagens adicionais têm-se a redução significativa da massa e do volume do material, facilitando o transporte e a estocagem. Porém, a secagem pode causar deterioração na qualidade e no valor nutricional do produto e por isso é importante construir um equipamento que irá minimizar os efeitos indesejáveis obtendo-se taxas de secagem eficientes (SHILTON, 2002).

Durante a secagem por convecção, dois mecanismos de transporte geralmente ocorrem de modo simultâneo: (1) transferência de calor do meio externo para a superfície do material, por convecção, combinada com a transferência de calor no interior do material, por condução; e (2) transferência de massa no interior do material seguida por transporte externo da umidade para o meio. Dependendo do produto alimentício e das condições de secagem, a vaporização pode ocorrer também na superfície ou dentro do produto (VALENTAS et al., 1997).

A energia para promover a remoção de umidade é transferida para o material a ser seco por dois mecanismos: a convecção, quando a energia para a evaporação é suprida por uma corrente de ar aquecido fluindo sobre ou através do material; e a condução, quando o material está em contato com uma superfície quente. A transferência de calor dentro do produto ocorre por condução devido ao gradiente interno de temperatura e em menor extensão devido à migração de umidade, contudo se houver evaporação dentro do material esta relação não é respeitada (BARBOSA-CANOVAS e VEGA-MERCADO, 2000). Na superfície do produto, ocorre a transferência simultânea de calor e de massa. O transporte de vapor da superfície para o ar e a transferência de calor do ar para a superfície do produto é uma função da pressão de vapor existente e dos gradientes de temperatura, respectivamente (SINGH e HELDMAN, 1993). O transporte de massa ocorre devido a um gradiente de concentração. Quantidades significativas de remoção de umidade de um alimento ocorrem devido à difusão de líquido e/ou vapor de água através da estrutura do produto. Este estágio de movimento de umidade seguirá a evaporação da água em alguns locais dentro do produto e o movimento de umidade torna-se função do gradiente de pressão de vapor.

O fluxo de água pode ser causado por uma combinação de diferentes mecanismos de transporte, segundo (VALENTAS et al., 1997): movimento de líquido por forças capilares, difusão de líquidos causada pelas diferenças na concentração dos solutos em diferentes regiões do alimento, difusão de líquidos que são adsorvidos em camadas nas superfícies dos componentes sólidos do alimento e difusão de vapor de água em espaços de ar dentro do alimento causada por gradientes de pressão de vapor. A convecção é a responsável pela transferência de massa dos produtos para o meio, devido a uma diferença na pressão parcial de vapor na interface produto-ar.

Um dos parâmetros mais importantes na desidratação de alimentos é a condição de equilíbrio que estabelece um limite para o processo. A atividade de água é um parâmetro que foi criado para descrever a umidade de equilíbrio. Por definição, é a umidade relativa de equilíbrio do produto dividida por 100. A umidade de equilíbrio varia de produto para produto em função de suas características químicas, da porosidade e da umidade relativa e temperatura do ar (SINGH e HELDMAN, 1993). A relação entre o conteúdo de água e a atividade de água ou pressão de vapor relativa a uma dada temperatura é conhecida como isoterma de sorção de água e este conceito é usado para estabelecer as especificações do produto para a secagem, a armazenagem e a embalagem. Para a maior parte dos alimentos, a relação entre conteúdo de umidade e atividade de água é ilustrada na forma de isotermas de adsorção ou de desorção (secagem) de umidade (MACCARTHY, 1989), conforme apresentado na Fig. 2.6. Geralmente, as isotermas de adsorção são requeridas para a observação de produtos higroscópicos e as de desorção são usadas na investigação do processo de secagem. Uma curva abruptamente arredondada indica que o material é higroscópico e uma curva mais achatada representa um produto que não é muito sensível à umidade. É evidente na observação destas curvas que um produto de alta higroscopicidade ou de condições higroscópicas pode ser definido como aquele onde um pequeno aumento no conteúdo de umidade resulta em um grande aumento na atividade de água do alimento.

O fenômeno de secagem fundamenta-se no conhecimento do conteúdo inicial e final (equilíbrio) de umidade do material, da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua

superfície. Este não pode ser generalizado para materiais biológicos, pois possuem características próprias e propriedades que podem sofrer importantes alterações durante a secagem (PARK et al., 2001).

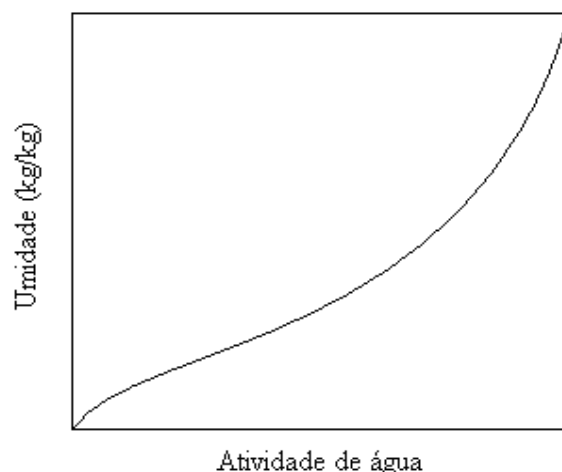


Figura 2.6 – Isoterma de desorção de umidade.

O conteúdo de umidade de equilíbrio de um material é definido como o conteúdo de umidade que existe quando o material está à condição de equilíbrio com o meio circundante. No processo de desidratação, isto representa o conteúdo de umidade do produto que é alcançado ao fim da secagem para uma dada condição de temperatura. A magnitude do conteúdo de umidade de equilíbrio é estabelecida pela estrutura do material e pela maneira como a água está retida ou ligada ao produto. Devido à presença de água nos produtos alimentícios, a maioria deles exibe uma isoterma no formato sigmoidal (HELDMAN e SINGH, 1981). Dados experimentais são usualmente representados como curvas de secagem ou curvas de taxa de secagem. As curvas de secagem são obtidas dos dados de conteúdo de umidade de um produto submetido à secagem, em que a massa da amostra é registrada continuamente como função do tempo. Estes dados permitem calcular o conteúdo de umidade em base seca. O conteúdo de umidade livre é o conteúdo de umidade em base seca menos o conteúdo de umidade de equilíbrio. O conteúdo de umidade *versus* o tempo é mostrado na Fig. 2.7, onde se pode observar que a curva é constituída de vários períodos de secagem. A remoção inicial de umidade ocorre concomitantemente com o

aumento de temperatura sofrido pelo produto e pela água dentro dele. Em seguida, reduções significativas no conteúdo de umidade ocorrerão a uma taxa constante e a uma temperatura constante. Esta fase de secagem ocorre com o produto à temperatura de bulbo úmido do ar. Na maioria das situações, o período de secagem a taxa constante terá fim em um conteúdo crítico de umidade e será seguido de um ou mais períodos de secagem de taxa decrescente (SINGH e HELDMAN, 1993). O conteúdo de umidade crítico varia para cada produto em função das condições de secagem, tais como temperatura e umidade relativa do ar.

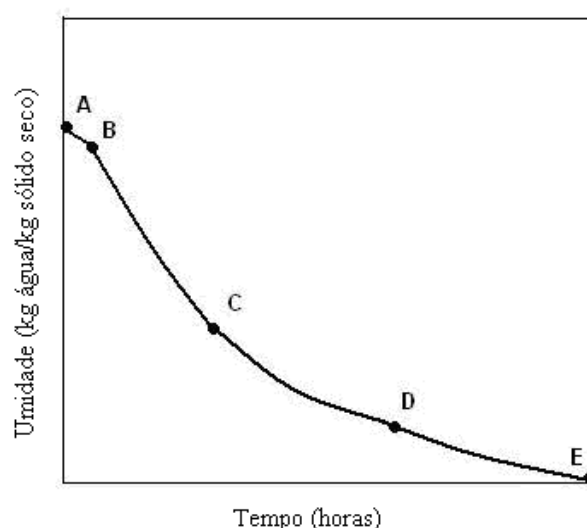


Figura 2.7 – Perda de umidade de um alimento em função do tempo de secagem.

Primeiramente, a umidade é removida por evaporação a partir da superfície saturada. Depois a área da superfície saturada decresce gradualmente, seguida pela evaporação de água nas partes interiores da amostra (HELDMAN e SINGH, 1981). Isto significa que quando a superfície do produto está saturada de água, a secagem é mais rápida e vai tornando-se mais lenta à medida que é necessário que a água migre de dentro do produto para o seu exterior.

A curva na Fig. 2.8 mostra a presença de um período de aquecimento AB, um período de velocidade constante BC e um período de taxa decrescente CE. O conteúdo de umidade no ponto C, onde a taxa de secagem muda de constante para decrescente, é chamado de conteúdo de umidade crítico, o qual depende de

diversos fatores característicos do produto que está sendo desidratado, assim como das condições de secagem. O período de taxa decrescente é constituído de duas partes: CD, o primeiro período de taxa decrescente, e DE, o segundo período de taxa decrescente. Durante o período de secagem com taxa constante, a taxa de remoção da umidade do produto é limitada apenas pela taxa de evaporação da água na superfície do produto. A taxa de secagem constante continuará enquanto a migração de umidade do interior do alimento para a sua superfície for mais rápida do que a evaporação da umidade da superfície do produto para o ar de secagem.

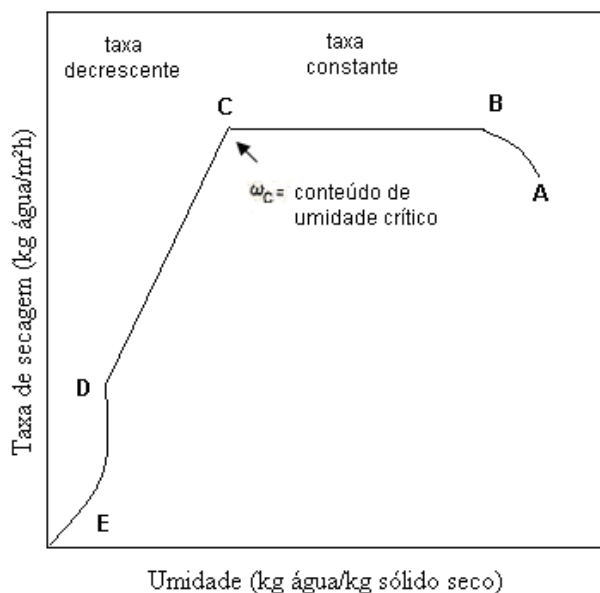


Figura 2.8 – Curva típica da taxa de secagem para um alimento.

A taxa de evaporação depende fundamentalmente de dois fatores: o coeficiente de transferência de calor por convecção e o coeficiente de transferência de massa por convecção, sendo que o último descreve a transferência de umidade do produto para o ar circundante. Depois de atingido o conteúdo de umidade crítico, o processo de secagem prossegue a uma taxa decrescente. Na maioria dos casos, isso acontece devido à ação das resistências internas ao sólido, a qual dificulta o movimento da umidade em direção à superfície do produto. Após alcançar o conteúdo crítico de umidade, a taxa de secagem pode decrescer linearmente com o conteúdo de umidade. No primeiro

período de taxa decrescente a área de superfície saturada decresce à medida que o movimento de umidade dentro do sólido não pode mais suprir umidade suficiente para ser vaporizada na superfície do alimento e então a taxa de secagem decresce com o aumento da área de superfície não saturada. Os fatores que influenciam a taxa de secagem incluem aqueles que afetam o movimento de umidade para fora do sólido em adição à taxa de movimento de umidade interno. Quando a área de superfície inteira alcança o estado não saturado, o movimento interno de umidade torna-se o fator controlador da taxa de secagem.

Conforme pode ser observado na Fig. 2.9, a redução da umidade de um alimento até a atividade de água igual a 0,7 previne contra o crescimento de microorganismos. Entretanto, outros processos deteriorativos ocorrem neste valor de atividade de água, como a atividade enzimática. A partir da figura é possível concluir que um processo de desidratação requer uma atividade de água ao redor de 0,3 no equilíbrio para minimizar todos os processos deteriorativos.

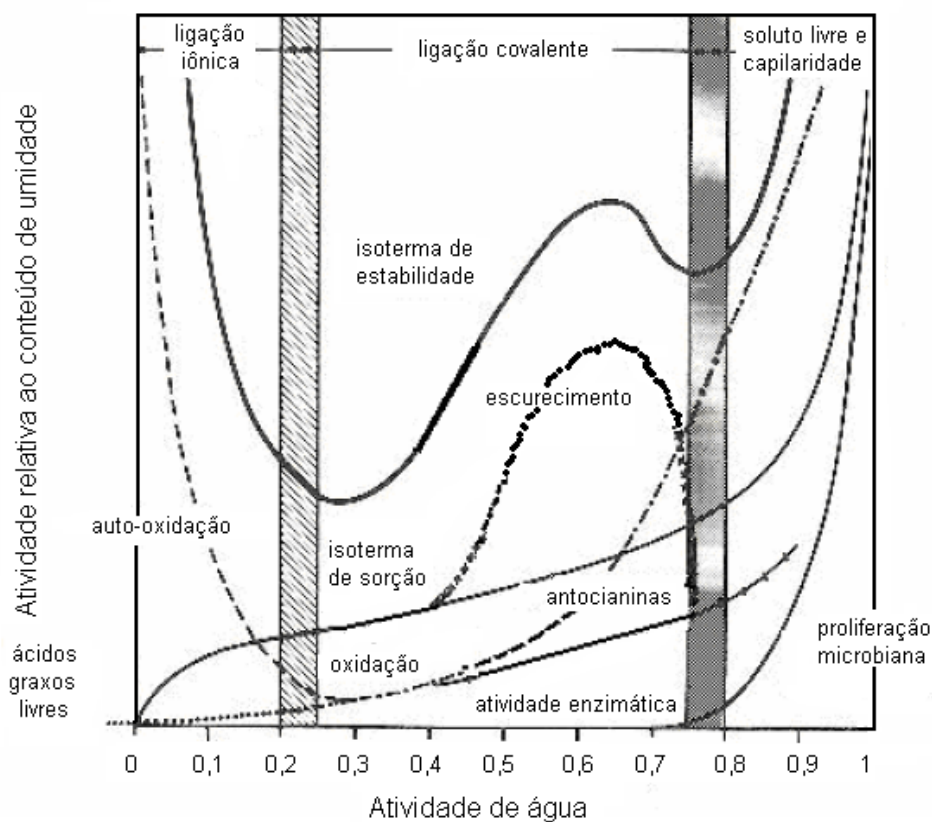


Figura 2.9 – Reações deteriorativas em alimentos em função da atividade de água
(Fonte: SINGH e HELDMAN, 1993).

2.3.2 Efeito das variáveis de processo

A intensidade da secagem, a qual reflete a troca do conteúdo de umidade com o tempo, é influenciada significativamente pelas variáveis do processo, tais como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar e também pela geometria da partícula (STRUMILLO e KUDRA, 1986). De acordo com Nicoletti (2001), outros fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, compreendendo a constituição química e física das paredes das células, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor e a característica do equipamento de secagem.

A taxa de secagem convectiva aumenta ao se elevarem a temperatura e a velocidade do ar, devido ao incremento nas taxas de transferência de calor e umidade. Em problemas de secagem de alimentos, porém, utilizam-se temperaturas amenas, na faixa de 40°C a 80°C, devido aos efeitos indesejáveis da temperatura nas características sensoriais do produto obtido. Reações enzimáticas ou de oxidação, as quais são dependentes da temperatura, podem modificar a cor, o sabor e o valor nutritivo dos alimentos. A temperatura elevada ocasiona também maior perda de substâncias aromáticas voláteis do produto. Além disso, a capacidade de retenção de água é reduzida pelo processo de secagem, dificultando a reidratação do alimento.

Valores típicos de velocidade de ar em secagem de alimentos se encontram na faixa de 0,5 a 4,0 m/s (CHEMKHI et al, 2008; EL-AOUAR et al., 2006; PARK et al., 2001; ESAKI et al., 2002; MARQUES et al., 2007). A difusividade efetiva da água em alimentos aumenta com o incremento da velocidade do ar. Este comportamento pode ser explicado pela diminuição da resistência externa com o aumento do coeficiente convectivo, em função da elevação da velocidade e da temperatura do ar de secagem (PARK et al., 2001).

Durante secagem do capim-limão em leito fixo, Peisino et al. (2005), encontraram que uma combinação de maiores velocidades e maiores temperaturas do ar (na faixa de 0,2 m/s a 0,8 m/s e 40°C a 90°C, respectivamente) reduziu o tempo de secagem e aumentou significativamente o rendimento do processo, porém prejudicou o conteúdo de óleo essencial do capim-limão. Estudando a secagem de tomate em estufa usando temperaturas de

60°C a 80°C, Romero-Peña e Kieckbusch (2003) obtiveram maior taxa de secagem para a temperatura mais elevada, porém menor intensidade da cor vermelha inicial. O conteúdo de ácido ascórbico, no entanto, não sofreu alteração em função da temperatura utilizada.

2.3.3 Secagem convectiva precedida de desidratação osmótica

A desidratação osmótica é largamente utilizada para remover parte do conteúdo de umidade de um produto para obter um produto de umidade intermediária ou como um pré-tratamento antes de outros processos, como secagem convectiva (KOTOVICZ, 2011; EL-AOUAR et al., 2003; PIOTROWSKI et al., 2004; MANDALA et al., 2005; TORREGGIANI e BERTOLO, 2001), congelamento (PONTING, 1973), *freeze drying* (HAWKES e FLINK, 1978), e secagem a vácuo (DIXON e JEN, 1977). Além de reduzir o conteúdo de umidade do produto, o pré-tratamento osmótico pode melhorar as propriedades nutricionais, sensoriais e funcionais do alimento sem alterar sua integridade (TORREGGIANI, 1993). Combinada com outras tecnologias de secagem, a desidratação osmótica fornece uma oportunidade de produzir novos tipos de produtos estáveis com alta qualidade sensorial (RAGHAVARAO et al., 2002; SILVEIRA et al., 1996; TAN et al., 2001).

Como o pré-tratamento osmótico reduz o conteúdo de umidade inicial dos produtos submetidos à secagem, acarreta menor tempo de exposição a altas temperaturas, e, portanto, menores danos térmicos ao produto, decorrentes do escurecimento enzimático e não-enzimático, despolimerização de açúcares, desnaturação de proteínas, gelatinização do amido, perda de aromas voláteis, redução da cor, dentre outros. Além disto, o ganho de sólidos da solução desidratante pode conferir sabor agradável ao produto, além de ocasionar maior estabilidade dos pigmentos durante a estocagem do produto seco.

Existe extensa literatura acerca da aplicação dos processos de desidratação osmo-convectiva em alimentos (BERNARDI et al., 2009; CORRÊA et al. 2008; MARQUES et al., 2007; SAPATA et al., 2009; GONÇALVES e BLUME, 2008; PEKOSŁAWSKA e LENART, 2007; PAVKOV et al, 2009; QUEIROZ et al., 2007; SANJINÉZ-ARGADOÑA, 1999; SOUZA NETO et al., 2005;

LOMBARD et al., 2008, dentre outros). Especificamente sobre o yacon, contudo, existem poucos estudos em secagem osmo-convectiva, podendo-se citar os trabalhos de Kotovicz (2011), Masson et al (2004) e Moura (2004). A grande maioria dos trabalhos em processamento de yacon são relativos à secagem convectiva, utilizando ou não pré-tratamento com agentes químicos ou branqueamento (PADILHA et al., 2009, SCHER et al., 2009, KROKIDA, 2001), embora alguns estudos sobre atomização e liofilização também tenham sido realizados por Marangoni et al. (2004).

Apesar da importância tecnológica da etapa de tratamento osmótico, sua taxa de transferência de massa é bastante lenta, razão pela qual sua aplicação tem sido conduzida apenas em escala piloto, em estudos desenvolvidos por pesquisadores. No entanto, esta técnica vem ganhando notoriedade na área de novas tecnologias da indústria alimentícia e bastante esforço tem sido feito no intuito de aumentar as taxas de transferência de massa e viabilizar a aplicação desta técnica em escala industrial. Alguns exemplos de estudos relacionados incluem a aplicação de alta pressão hidrostática (RASTOGI e NIRANJAN, 1998) ou pulsos elétricos de alta intensidade ao alimento (RASTOGI et al., 1999) antes da desidratação osmótica, ou aplicação de ultrassom (SIMAL et al., 1998), vácuo parcial (FITO, 2001; RASTOGI e RAGHAVARAO, 1996) ou força centrífuga (AZUARA et al., 1992) ao produto durante o tratamento osmótico.

2.4 Modelagem de processos de secagem osmo-convectiva

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de secagem e do produto a ser desidratado apresenta-se como ferramenta útil no desenvolvimento de secadores eficientes (SOUZA et al., 2002), buscando a melhoria da qualidade do produto e a otimização energética do processo.

Quando se trata de modelagem de problemas de secagem convectiva, a maior parte dos estudos utiliza uma abordagem fenomenológica, baseada nas equações de transferência de calor (Lei de Fourier) e de massa (Lei de Fick). Perussello (2008) modelou o processo de secagem de *pellets* de okara em um secador de tambor rotativo e em um secador de tubo pneumático. Utilizou-se a

discretização espacial e temporal das equações de Fick e Fourier, para uma geometria esférica, pelo Método das Diferenças Finitas (MDF). A concordância entre resultados experimentais e numéricos foi considerada satisfatória ($R^2 > 0,9$). Almeida e Bacelos (2002) modelaram o fenômeno do encolhimento durante a secagem de batatas, cortadas em esferas, secas em estufa de convecção natural a 60°C. Foi utilizado o modelo difusivo baseado na 2ª Lei de Fick, o qual foi solucionado numericamente pelo Método dos Volumes Finitos (MVF). Migliori et al. (2004) modelaram o processo de secagem de macarrão e avaliaram os parâmetros de processo (temperatura e tempo de secagem) em termos de sua influência nos índices de qualidade do produto final (conteúdo de furosina e índice colorimétrico). A solução numérica foi realizada pelo MDF. Carmo e Lima (2005) simularam numericamente a secagem da lentilha considerando o encolhimento. O modelo de difusão transiente bi-dimensional escrito no sistema de coordenadas esferoidais oblatas foi discretizado pelo MVF e uma boa concordância entre os resultados numéricos do conteúdo de umidade médio e os dados experimentais foi obtida. Boeri e Khatchatourian (2005) construíram um modelo matemático para simulação da secagem de grãos de soja descrevendo a dinâmica da variação do teor de umidade e da temperatura dos grãos e do ar no secador de fluxo cruzado. O sistema de equações governantes foi resolvido pelo método de MacCormack, obtendo-se resultados satisfatórios.

A modelagem da cinética de desidratação osmo-convectiva, contudo, é mais complexa, devido à existência de dois fluxos de massa simultâneos durante o tratamento osmótico: um fluxo de água do alimento para a solução e outro de soluto proveniente da solução osmótica para o produto (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997). Alguns trabalhos têm sido conduzidos na última década a respeito do uso de ferramentas de modelagem em problemas de secagem de alimentos com pré-tratamento osmótico. Embora a maior parte dos trabalhos utilize uma abordagem empírica, cujo modelo é construído a partir de observações experimentais (PARK et al., 2001; PEISINO et al., 2005; SILVA et al., 2005; TELES, et al., 2008), existem estudos que utilizam uma modelagem fenomenológica, baseada na Lei de Fick (Teoria Difusional).

El-Aouar e Murr (2003) modelaram a desidratação osmótica de manga através do modelo difusional para geometria cúbica. Marques et al. (2007)

compararam 3 modelos matemáticos para a secagem do caju sem epiderme, o modelo de Fick com 3 termos da série e os modelos empíricos de Page e Cavalcanti Mata. Os parâmetros dos modelos foram obtidos por análises de regressão não linear. Outro modelo foi desenvolvido e implementado por meio do Método dos Elementos Finitos por Flourey et al. (2008), utilizando uma geometria tridimensional para a desidratação osmótica de mangas. Borsato et al. (2009) modelaram e simularam o processo de desidratação osmótica de abacaxi usando o MEF para a discretização das equações governantes do problema, baseadas na Segunda Lei de Fick. A solução do sistema foi realizada pelo método do gradiente conjugado. Outra parte dos trabalhos utiliza métodos baseados em Sistemas Inteligentes, como foi feito por Moura (2004), que aplicou redes neurais para prever e otimizar a secagem osmo-convectiva do yacon.

Dentro do contexto da modelagem matemática, é de extrema importância conhecer as propriedades termofísicas dos alimentos, as quais influenciam no design, otimização e redução de custos do processo, assim como na qualidade e segurança do produto final. Devido às características altamente variáveis dos alimentos, que adicionalmente passam por diversas condições de processamento, ainda não foi possível propor um modelo generalizado para prever suas propriedades termofísicas. Em literatura, existem correlações empíricas para se obter as propriedades termofísicas de alimentos com base em sua composição centesimal. Tais correlações são apresentadas em função da temperatura ou conteúdo de umidade do produto. A equação mais geral utilizada atualmente para determinar propriedades como massa específica, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica consiste em uma média ponderada do valor das propriedades termofísicas de cada componente básico de um alimento (água, proteínas, minerais, gorduras e carboidratos). Vários outros modelos empíricos, os quais consistem em uma função polinomial baseada na composição centesimal do alimento, foram compilados por Heldman (2001) e Okos e Choi (1986). Apesar de que estas equações não consideram a influência da interação entre os componentes puros nas propriedades termofísicas dos alimentos, existem inúmeros estudos que usam tal metodologia, dada a sua conveniência (DIMA et al., 2012; VAN DER SMAN, 2008; PEACOCK, 1995; PHOMKONG et al., 2006). Embora exista uma vasta compilação de dados experimentais acerca de

propriedades termofísicas de alimentos (ASHRAE, 2002; OKOS e CHOI, 1986; POLLEY et al., 1980; MOHESNIN et al., 1980; QASHOU, 1973; e WOODAMNS e NOWREY, 1968), não existem estudos aplicados ao yacon.

2.5 Síntese do estudo bibliográfico

Em um mercado com demanda crescente por produtos que beneficiem a saúde do consumidor, o yacon tem conquistado cada vez mais espaço devido principalmente às suas comprovadas atividades prebiótica e antioxidante e ao seu baixo valor calórico. O yacon, contudo, possui vida útil muito curta sob condições ambientais, o que leva à necessidade de processá-lo. O produto desidratado, por exemplo, pode ser consumido na forma de chips ou transformado em pó e utilizado na formulação de grande variedade de produtos alimentícios.

A secagem osmo-convectiva é uma excelente alternativa para se obter yacon desidratado em curto tempo de processo, por meio de técnicas relativamente simples e de baixo custo, de maneira que ele adquira vida de prateleira alta e sofra mínima elevação dos teores de açúcar durante o processamento, decorrentes da ação térmica e enzimática na hidrólise dos FOS. Ganhos adicionais de qualidade em termos de cor, textura e diminuição do grau de escurecimento podem ser obtidos por meio da aplicação desta tecnologia.

A existência de dois fluxos opostos e simultâneos durante a desidratação osmótica é uma das maiores dificuldades para se modelar a cinética deste processo (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997), razão pela qual a maior parte dos trabalhos utiliza uma abordagem empírica, cujo modelo é construído a partir de observações experimentais. Todavia, existem também estudos que utilizam a modelagem fenomenológica, baseada na Segunda Lei de Fick (EL-AOUAR e MURR, 2003; FLOURY et al., 2008; BORSATO et al., 2009). Para se modelar a etapa de secagem convectiva, a maioria dos estudos utiliza modelos baseados nas equações em regime transiente de transferência de calor (Segunda Lei de Fourier) e de massa (Segunda Lei de Fick), como foi feito por Perussello et al. (2009), Almeida e Bacelos (2002), Migliori et al. (2004) e Carmo e Lima (2005).

Face ao exposto neste capítulo, não foi encontrado na literatura nenhum estudo que avalie a influência das condições de operação da secagem osmo-

convectiva tanto na cinética de secagem quanto nos atributos de qualidade do yacon. Além disso, até o momento, também não foram publicados trabalhos acerca da determinação de propriedades termofísicas do yacon e estudos que contemplem o desenvolvimento de um modelo fenomenológico que aborde os dois fluxos mássicos principais existentes nesse processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e reagentes

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) foi adquirido no Mercado Municipal de Curitiba e armazenado sob refrigeração por até 7 dias antes do uso. A seleção da matéria-prima baseou-se no tamanho e textura das raízes, na cor e uniformidade da casca e na ausência de rachaduras.

O agente desidratante utilizado no pré-tratamento osmótico foi a sucralose em pó da marca Linea®. A escolha por este edulcorante se deu em função de suas características de baixo valor calórico, estabilidade à temperatura e ao pH e alta solubilidade em água (VITOLLO, 2003; NACHTIGALL e ZAMBIAZI, 2006, JENNER e SMITHSON 1989).

Os reagentes ácido sulfúrico concentrado P.A. (96% de pureza), hidróxido de sódio 50% P.A. (97% de pureza), ácido sulfúrico 0,1N P.A. (96% de pureza) e éter etílico P.A. (98% de pureza), todos da marca VETEC, foram utilizados para a análise de teor de proteínas e de lipídios. Os padrões analíticos *Fructooligosaccharides from chicory*, frutose D- 99%, glicose D+ 99,5% e sacarose 99,5% GC, todos da Marca Sigma-Aldrich, e a fase móvel água ultra pura foram empregados na análise cromatográfica de açúcares. A fim de preparar as amostras de yacon para a cromatografia, fez-se uso de membranas PVDF (fluoreto de polivinilideno) hidrofílicas com poros de 0,20 µm da marca Chromafil Xtra, do tipo PA-20/25, e de seringas de 20 mL.

3.2 Metodologia

Os testes experimentais foram conduzidos na Universidade Federal do Paraná (UFPR) e na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Os testes realizados na UFPR foram: ensaios de desidratação osmótica e análise de composição centesimal, no Laboratório de Química Analítica Aplicada, ensaios de secagem convectiva, na Usina Piloto de Tecnologia de Alimentos, e análise cromatográfica de açúcares, no Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (CEPPA). A determinação de propriedades termofísicas foi conduzida

no Laboratório de Ciências Térmicas da PUCPR. A modelagem matemática foi realizada na *Queensland University of Technology*, na Austrália, e na UFPR. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

3.2.1 Composição centesimal do yacon *in natura* e após o tratamento osmótico

A composição centesimal do yacon foi realizada segundo técnicas padronizadas da AOAC (*Association of Official Analytical Chemists*), as quais podem ser encontradas em Matissek et al. (1998). A análise de proteínas foi realizada pelo método da digestão *Kjedahl*, a avaliação de lipídeos foi feita pela extração contínua em aparelho do tipo *Soxhlet* e a análise de cinzas ou resíduo mineral fixo foi feita por perda de massa através de incineração da amostra em forno mufla a 550°C. A umidade foi determinada por análise gravimétrica, em estufa regulada em 105°C. Os carboidratos totais foram calculados por diferença.

3.2.2 Conteúdo de açúcares do yacon *in natura* e desidratado osmoticamente

A quantificação de açúcares das amostras de yacon antes e após o tratamento osmótico foi realizada por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC). Avaliaram-se o conteúdo de FOS e açúcares livres (sacarose, frutose e glicose) do yacon *in natura* e após a desidratação osmótica, assim como o conteúdo de sucralose das amostras tratadas. Para tanto, utilizou-se o sistema cromatográfico Agilent HP 1110, a coluna Rezex RSO (*oligosaccharide* Ag+4%, 200 X 10 mm) e a pré-coluna Rezex RSO (*oligosaccharide* Ag+4%, 60 X 10 mm). As condições de operação foram 80°C para a temperatura da coluna, 0,5 mL/min para a vazão de solução, 100 µL para o volume de injeção e 30 minutos para o tempo de corrida. Para a avaliação da absorção de sucralose, foi utilizada a sucralose comercial da marca Linea[®], dada a impossibilidade de se encontrar este padrão analítico. As curvas de calibração foram construídas a partir de 5 diluições para cada padrão, em ppm: 1000, 750, 500, 250 e 125.

O preparo das amostras para a análise cromatográfica, a fim de se extrair os açúcares das amostras de yacon, foi realizado de acordo com a metodologia descrita em Oliveira e Nishimoto, 2004. Primeiramente, adicionou-se água a 95°C

ao yacon na proporção de 1:1 (m/m). A mistura foi processada em sistema geral com pistilo de porcelana, peneirada e transferida para um béquer de 250 mL, coberto com papel alumínio. Em seguida, as amostras foram aquecidas em placa quente (BB-IVA, modelo XMTD-701) por 10 minutos a 95°C e, após resfriadas até temperatura ambiente, foram filtradas com bomba a vácuo e papel filtro. O material resultante foi congelado, em triplicata, até a data da análise de HPLC. Após o descongelamento, fez-se a diluição das amostras, com água destilada, até a concentração de 1°Brix, para que a diluição das amostras fosse a mesma do padrão analítico de frutooligossacarídeos utilizado. Em seguida, as amostras foram aquecidas em banho termostático a 35°C para facilitar a solubilidade dos açúcares e centrifugadas a 5000 rpm durante 10 minutos, com o uso de uma centrífuga microprocessada (Excelsa II, modelo 206 BL, marca FANEM). Por último, as amostras foram filtradas em seringas de 20 mL com membrana hidrofílica PVDF e armazenadas em *vials* para posterior análise de açúcares.

3.2.3 Conteúdo de sólidos solúveis do yacon *in natura* e desidratado osmoticamente

A determinação do conteúdo de sólidos solúveis, cujos resultados são dados em °Brix, foi feita por meio de refratometria (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985) com um refratômetro da marca PZO Warszawa, modelo RL3. As amostras foram preparadas mediante a pressão mecânica das fatias de yacon, de maneira a se obter um extrato, o qual foi homogeneizado por agitação manual.

3.2.4 Encolhimento do yacon durante a secagem osmo-convectiva

O encolhimento do yacon, avaliado a cada 30 minutos de processo, foi determinado a partir da medição do diâmetro da seção média das fatias de yacon com um paquímetro (marca Mitutoyo, precisão 0,05 mm), conforme demonstrado na Fig. 3.1.

O encolhimento percentual (ΔD) ao fim das etapas de desidratação osmótica e secagem convectiva foi calculado por

$$\Delta D = 100 \left(\frac{D_0 - D_f}{D_0} \right), \quad (1)$$

onde D_0 e D_f são os diâmetros no início e no fim do processo [mm], respectivamente.



Figura 3.1 – Método de determinação do diâmetro das fatias de yacon.

3.2.5 Mudança de cor do yacon durante a secagem osmo-convectiva

A cor do produto foi determinada por meio de um colorímetro (marca Hunter Lab Mini Scan, modelo XE Plus), de acordo com o sistema da *Commision Internationale L'Eclairage*, a qual estabelece as coordenadas uniformes $L^*a^*b^*$ no espaço tridimensional de cor (LAWLESS e HEYMANN, 2010). A luminosidade, representada pela coordenada L^* , varia de 0 (escuridão) a 100 (luminosidade). A diferença de luminosidade, que representa o grau de escurecimento do yacon, foi calculada por

$$\Delta L^* = L_0^* - L_f^*, \quad (2)$$

onde L_0^* é a luminosidade das fatias *in natura* e L_f^* é a luminosidade do yacon em um tempo de processo determinado.

A informação de *chroma* é representada pelas coordenadas a^* e b^* : a^* corresponde ao eixo compreendido entre o verde e o vermelho e b^* representa o

eixo compreendido entre o azul e o amarelo, ambas assumindo valores entre -60 e +60. As variações em a^* e b^* foram calculadas respectivamente por:

$$\Delta a^* = a_0^* - a_f^* \quad (3)$$

e

$$\Delta b^* = b_0^* - b_f^*, \quad (4)$$

onde a_0^* e b_0^* são as coordenadas *chroma* das fatias *in natura* e a_f^* e b_f^* são as coordenadas chroma do yacon em um tempo de processo determinado.

A mudança de cor é representada pelo índice ΔE , que constitui a resposta y_2 do planejamento experimental. O cálculo de ΔE foi feito por:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}. \quad (5)$$

3.2.6 Variações de umidade e temperatura do yacon durante a secagem osmo-convectiva

A cada 30 minutos de secagem osmo-convectiva, uma amostra foi retirada do sistema para determinação de seu conteúdo de umidade por meio de análise gravimétrica (MATISSEK et al., 2008). A temperatura do produto foi determinando utilizando-se termopares tipo T e um sistema de aquisição de dados (*Field Logger*, marca Novus) conectado a um computador. Os sensores foram posicionados na borda e no centro das fatias de yacon e os dados de temperatura foram registrados a cada 10 segundos de processo.

3.2.7 Atividade de água do yacon durante a secagem osmo-convectiva

A atividade de água do yacon foi determinada antes e após o tratamento osmótico e a cada 30 minutos durante a secagem convectiva utilizando o higrômetro Aqualab 3TE de leitura direta.

3.2.8 Planejamento experimental

De maneira a avaliar a influência dos parâmetros de processo nos atributos de qualidade do produto final, definiu-se um planejamento experimental completo 2^3 (RODRIGUES e IEMMA, 2005), onde 2 relaciona-se ao número de níveis estudados e 3 diz respeito ao número de variáveis sendo avaliadas. Tais variáveis são a temperatura e a taxa de agitação da solução osmótica e a temperatura da secagem convectiva. A faixa de valores de cada variável estudada foi definida com base em testes preliminares e no estudo bibliográfico. O desenho experimental, esquematizado na Tabela 3.1, gerou um total de 8 testes (Tab. 3.2), realizados em triplicata.

Tabela 3.1 – Planejamento experimental.

Variável	Código da variável	Nível	
		-1	1
Temperatura da solução (°C)	x1	30	50
Taxa de agitação da solução (cm.s ⁻¹)	x2	0	4
Temperatura de secagem (°C)	x3	60	80

Tabela 3.2 – Testes resultantes do planejamento experimental.

Teste	x1 (°C)	x2 (cm/s)	x3 (°C)
1	30	0	60
2	50	0	60
3	30	4	60
4	50	4	60
5	30	0	80
6	50	0	80
7	30	4	80
8	50	4	80

Os pontos centrais não foram avaliados. De acordo com Rodrigues e Iemma (2005), o delineamento ideal é aquele em que se possa repetir ensaios nos pontos fatoriais e, além disso, realizar alguns ensaios no ponto central.

Entretanto, isto em geral não é possível em ensaios com altos custos e grande demanda de equipamentos e/ou de tempo, como é o caso deste trabalho. Além disso, os testes experimentais nos pontos fatoriais é suficiente para avaliar os efeitos principais das variáveis independentes nas variáveis dependentes, isto é, nas respostas do processo. Assim, avaliou-se apenas os ensaios nos pontos fatoriais, todos em triplicata.

As respostas obtidas para os experimentos foram: y_1 = conteúdo de umidade b.u. (%), y_2 = mudança de cor (adimensional) e y_3 = concentração de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix).

3.2.9 Ensaios de desidratação osmótica

Os testes de desidratação osmótica foram conduzidos no Laboratório de Química Analítica Aplicada da Universidade Federal do Paraná. O tratamento osmótico foi realizado em um banho termostático (marca Quimis, modelo Dubnoff Q-226M2), dotado de controle de temperatura e agitação, utilizando-se solução de sucralose. Para cada ensaio, quatro béqueres contendo $140,0 \pm 0,5$ g de solução de sucralose a uma concentração de 20% (m/m) e $28,6 \pm 1,2$ g de fatias de yacon de espessura de aproximadamente 2 mm foram acondicionados no banho termostático durante 2 horas. A proporção entre o yacon e a solução foi de 1:5 (p/p). A temperatura e a taxa de agitação foram reguladas de acordo com o planejamento experimental, sendo 30°C ou 60°C para a temperatura da solução osmótica e 0 cm/s ou 4 cm/s para a agitação. O aparato experimental é apresentado na Fig. 3.2. Cada béquer foi removido do banho em um intervalo de tempo definido (30 min, 60 min, 90 min e 120 min), as fatias de yacon foram enxugadas com papel absorvente para retirada do excesso de solução e em seguida pesadas em balança analítica.

É importante reiterar que a sucralose foi escolhida como agente osmótico devido às suas características físico-químicas e nutricionais, conforme descrito na seção 3.1. Este edulcorante mantém-se estável durante o processamento térmico, na faixa de temperaturas utilizada neste trabalho, e possui valor calórico próximo de zero, portanto é adequado para ser aplicado em um produto que pode ser utilizado por portadores de diabetes tipo 2 e indivíduos que seguem uma dieta

hipocalórica. Além disso, vale mencionar que a concentração de 20% de sucralose da solução osmótica foi selecionada a partir de testes preliminares de solubilidade do edulcorante em água e da quantidade de produto que pode ser incorporada ao yacon sem conferir sabor demasiadamente doce ao produto final.

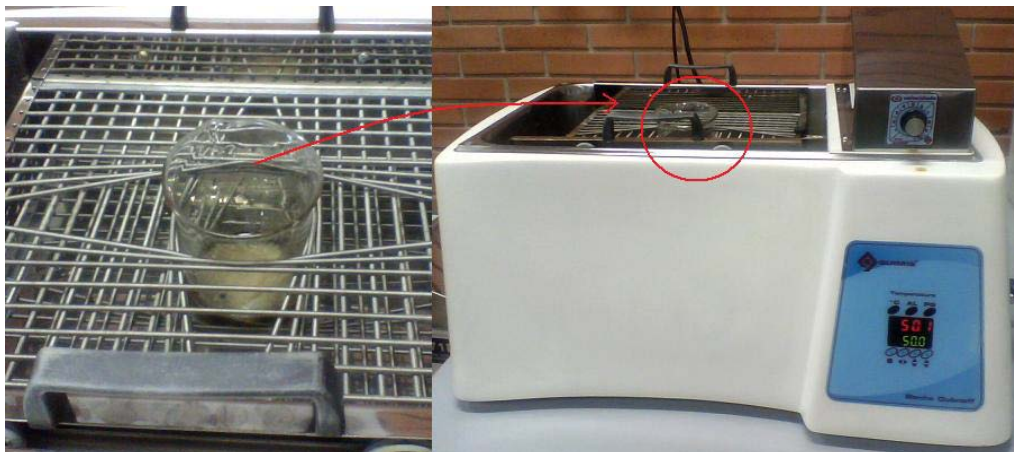


Figura 3.2 – Aparato experimental para a desidratação osmótica.

A variação de massa das fatias durante o tratamento osmótico, ΔM (g/g), foi calculada por

$$\Delta M = \frac{(M_{i+1} - M_i)}{M_i}, \quad (6)$$

onde M_i é a massa em um tempo i [g] e M_{i+1} é a massa no próximo intervalo de tempo [g], na desidratação osmótica.

Considerou-se que a perda de peso é constituída de duas partes: a transferência de componentes sólidos e a transferência de água. A massa dos sólidos do yacon, S_i (g), foi obtida por

$$S_i = M_i - \frac{X_i M_i}{100}, \quad (7)$$

onde S_i é a massa dos sólidos do yacon em um tempo i [g], X_i é o conteúdo de umidade (b.u.) em um tempo i [%], e M_i é a massa do yacon no tempo i [g].

A massa de água do yacon, $W_i(g)$, foi calculada por

$$W_i = \frac{X_i M_i}{100} . \quad (8)$$

Portanto, a variação de massa do yacon durante a desidratação osmótica, $\Delta M(g)$, também pode ser calculada por

$$\Delta M = M_i - M_o = S_i - S_o + W_i - W_o , \quad (9)$$

onde M_o , S_o e W_o são a massa da amostra [g], dos sólidos [g] e da água [g], respectivamente, para o yacon *in natura*.

3.2.10 Ensaio de secagem convectiva

A secagem convectiva foi realizada em um secador de bandejas de ventilação forçada (marca Fabbe, modelo 170), dotado de controlador de temperatura do tipo *on-off* (Fig. 3.3). O ar no interior do secador é aquecido por uma resistência elétrica localizada em sua base e é movimentado por um exaustor. Considerando-se que o ar é alimentado pela parte superior do equipamento, diretamente do ambiente externo, sua umidade relativa depende das condições ambientes de temperatura e umidade.

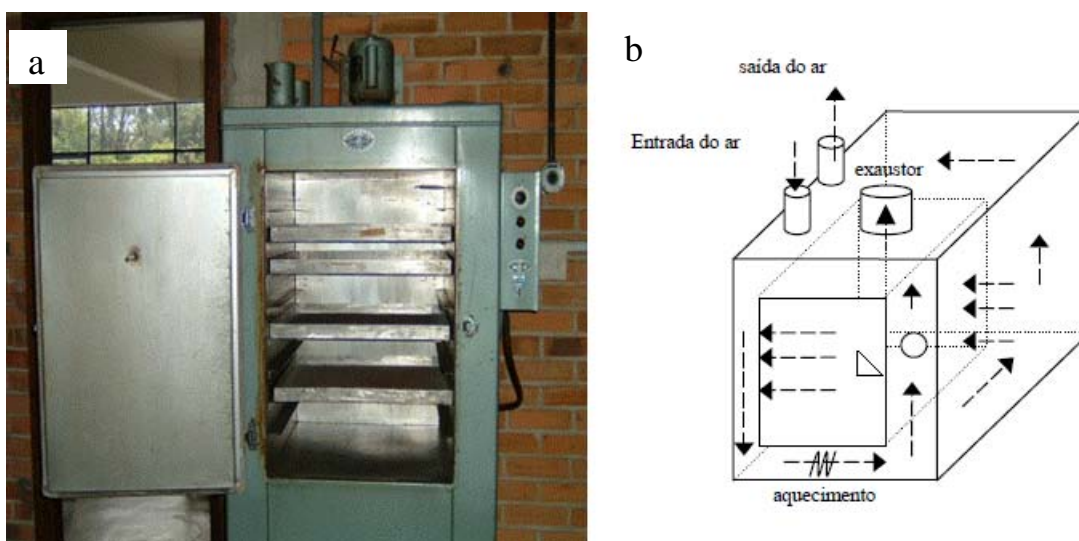


Figura 3.3 – Aparato experimental para a secagem convectiva: (a) secador de bandejas; (b) esquema de funcionamento do mesmo (Fonte: MOURA, 2004).

A velocidade e a umidade do ar foram determinadas com um medidor multifunção (marca Instrutemp, modelo ITMP 600). A velocidade manteve-se fixa em 0,4 m/s e a umidade média foi de $(22,80 \pm 7,34)\%$.

Os testes de secagem, conduzidos em triplicata, tiveram duração de 3 horas, baseando-se na metodologia adotada no estudo de Moura (2004) para a desidratação osmo-convectiva de fatias de yacon.

A massa das fatias de yacon durante a secagem convectiva, Mc (g/g), foi normalizada para que todas as curvas de secagem iniciassem no mesmo ponto, permitindo uma melhor comparação entre elas. Assim, a Mc foi calculada por

$$Mc = 100 \left(\frac{Mc_i}{Mc_0} \right), \quad (10)$$

onde Mc_i é a massa em um tempo i [g] e Mc_0 é a massa no início do teste [g], na secagem convectiva.

3.2.11 Análise estatística dos resultados

As análises estatísticas foram realizadas por meio do *software* Statistica 7.0. O teste t de *Student* foi utilizado para avaliar a influência das variáveis independentes do processo nos parâmetros de qualidade do produto final, em um intervalo de 95% confiança ($p \leq 0,05$). Para se delinear diferenças entre os resultados de composição centesimal, variação de massa, conteúdo de umidade, conteúdo de sólidos solúveis, conteúdo de FOS, absorção de sucralose e encolhimento entre amostras *in natura* e após diferentes tratamentos, foi utilizado o teste de *Tukey*, também em um intervalo de 95% confiança ($p \leq 0,05$) (KEPPEL e WICKENS, 2004).

3.2.12 Modelagem matemática do processo

Um modelo difusional em regime transiente foi desenvolvido e implementado no *software* COMSOL *Multiphysics*® 4.1, para uma geometria bidimensional e em coordenadas cilíndricas, com $r \in [0, R]$ e $z \in [0, \varepsilon]$, consistindo

de 3 equações para o tratamento osmótico (transferência de massa para as duas espécies difusivas e transferência de calor) e 2 equações para a secagem convectiva (transferências de massa e de calor). Para tanto, utilizaram-se os módulos *Transport of Diluted Species* e *Heat Transfer*. A malha, constituída por 612 elementos triangulares, foi criada automaticamente pelo *software*, o qual soluciona as equações governantes do problema pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

O domínio computacional é representado por um cilindro de raio maior do que a espessura, o qual representa uma fatia de yacon, conforme ilustrado na Fig. 3.4.

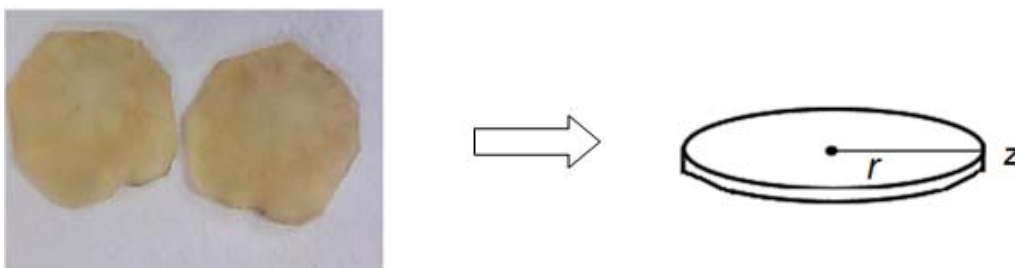


Figura 3.4 – Domínio computacional.

O balanço térmico no domínio acima foi escrito como

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (11)$$

onde T é a temperatura [K], t é o tempo de processo [s], ρ é a massa específica do produto [kg/m^3], C_p é seu calor específico [J/kg.K] e k é sua condutividade térmica [W/m.K].

As condições iniciais e de contorno para a transferência de calor foram definidas como: temperatura do produto conhecida e homogênea no início do processo (Eq. (12)), convecção na superfície do material (Eq. (13)) e fluxo nulo na região de simetria (Eq. (14)), conforme segue:

$$T = T_0 \text{ para } t = t_0 \text{ em } 0 < r < R \text{ e } 0 < z < \varepsilon, \quad (12)$$

$$k\nabla T = h(T_{\infty} - T) \text{ em } \begin{cases} \text{se } z = 0, 0 < r < R, \\ \text{se } z = \varepsilon, 0 < r < R \text{ e} \\ \text{se } r = R, 0 < z < \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

e

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em } 0 < z < \varepsilon \text{ se } r = 0, \quad (14)$$

onde T_0 é a temperatura inicial da fatia de yacon [K], t_0 é o tempo inicial de processo, T_{∞} é a temperatura do meio de secagem [K], R é o raio da fatia [m] e ε é sua espessura [m].

Na etapa de secagem convectiva, contudo, a face inferior da fatia não está em contato com o ar, portanto não ocorre convecção nesta superfície. Esta face está em contato direto com uma placa de alumínio, razão pela qual foi considerado, como hipótese simplificativa, que a sua temperatura é constante e igual à temperatura do ar, visto que a placa entra em equilíbrio térmico com o ar em poucos minutos de secagem. Desta maneira, a Eq. (13) não se aplica à etapa de secagem e pode ser substituída pelas Eqs. (15) e (16):

$$k\nabla T = h(T_{\infty} - T) \text{ em } \begin{cases} \text{se } z = \varepsilon, 0 < r < R \text{ e} \\ \text{se } r = R, 0 < z < \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

e

$$T = T_{\infty} \quad \text{em } 0 < r < R \text{ se } z = 0. \quad (16)$$

O balanço de massa foi escrito como

$$\frac{\partial(VC_i)}{\partial t} = VD_{ef-i} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \right], \quad (17)$$

onde C_i é a concentração da espécie i (água ou sucralose) no interior da fatia de yacon [mol/m^3], D_{ef-i} é o coeficiente de difusão [m^2/s] e V é o volume da fatia, variável em função do tempo de processo [m^3].

As condições iniciais e de contorno utilizadas foram: concentração da espécie difusiva (água ou sucralose) na fatia de yacon conhecida e homogênea no início do processo (Eq. (18)), condição convectiva na superfície da fatia (Eq. (19)) e fluxo nulo na região de simetria (Eq. (20)), conforme segue,

$$C_i = C_{i0} \text{ para } t = t_0 \text{ em } 0 < r < R \text{ e } 0 < z < \varepsilon, \quad (18)$$

$$D_{ef-i} \frac{\partial C_i}{\partial r} = h_m (C_{eq-i} - C_i) \text{ em } \begin{cases} \text{se } z = 0, 0 < r < R, \\ \text{se } z = \varepsilon, 0 < r < R \text{ e} \\ \text{se } r = R, 0 < z < \varepsilon \end{cases} \quad (19)$$

e

$$\frac{\partial C_i}{\partial r} = 0 \text{ em } 0 < z < \varepsilon \text{ se } r = 0, \quad (20)$$

onde C_{i0} é a concentração da espécie i (água ou sucralose) na fatia de yacon *in natura* [mol/m³] e C_{eq-i} é sua concentração de equilíbrio [mol/m³].

Para a etapa de secagem convectiva, a Eq. (19) pode ser substituída pelas Eqs. (21) e (22), visto que a face inferior da fatia de yacon não está em contato com o ar e pode ser considerada impermeável (CREMASCO, 2002):

$$D_{ef-i} \frac{\partial C_i}{\partial r} = h_m (C_{eq-i} - C_i) \text{ em } \begin{cases} \text{se } z = \varepsilon, 0 < r < R \text{ e} \\ \text{se } r = R, 0 < z < \varepsilon \end{cases} \quad (21)$$

e

$$\frac{\partial C_i}{\partial z} = 0 \text{ em } 0 < r < R \text{ se } z = 0. \quad (22)$$

3.2.13 Propriedades termofísicas

Para resolver o modelo, o COMSOL requer algumas propriedades termofísicas do produto e dos fluidos de secagem, assim como alguns parâmetros

de secagem (PRYOR, 2011). Todas as propriedades termofísicas utilizadas no modelo são variáveis ao longo do processo, em função da umidade do produto, conforme será apresentado no próximo capítulo, na Tab 4.11.

Para a etapa de secagem convectiva, as propriedades massa específica, calor específico e condutividade do yacon foram calculadas com base na composição centesimal do produto, a qual varia durante o processo, por meio das seguintes equações (SINGH e HELDMAN, 1993):

$$\rho = \frac{1}{\sum_j \frac{x_j}{\rho_j}}, \quad (23)$$

$$Cp = \sum_j (x_j Cp_j), \quad (24)$$

$$k = \frac{1}{2} \left[\sum_j x_{vj} k_j + \frac{1}{\sum_j \left(\frac{x_{vj}}{k_j} \right)} \right] \quad (25)$$

e

$$x_{vj} = \frac{\frac{x_j}{\rho_j}}{\sum_j \frac{x_j}{\rho_j}}. \quad (26)$$

onde x_j é a fração mássica de cada componente puro de um alimento e x_{vj} é sua fração volumétrica.

Como forma de confirmação dos resultados obtidos para a etapa de secagem convectiva por meio das Eqs. (23) a (26), também se utilizou o medidor multifunção (KD2 Pro, Decagon, USA) e a técnica da picnometria (QUIRION et al., 2012) para se obter as propriedades termofísicas do yacon. Conforme foi descrito na seção 3.2.1, a composição centesimal do yacon *in natura* foi obtida por meio de técnicas padronizadas da AOAC. Considerando-se que ocorre perda apenas de água durante a secagem convectiva, isto é, as quantidades dos outros componentes permanecem constantes, a composição do produto pôde ser calculada ao longo do processo. Durante a etapa de desidratação osmótica, contudo, as propriedades termofísicas calor específico e condutividade térmica

foram medidas em intervalos de 30 minutos com o medidor multifunção, dados os fluxos multicomponentes que tomam parte durante o processo, impossibilitando a determinação da composição do produto ao longo do tratamento da forma como foi feito para a secagem convectiva. A massa específica, por sua vez, foi obtida por meio de picnometria (QUIRION et al., 2012).

3.2.14 Coeficientes de transferência de calor e de massa

Os coeficientes difusivos da espécie i no interior do yacon, D_{ef-i} [m²/s], foram calculados por meio da solução analítica da Segunda Lei de Fick, a qual descreve o mecanismo difusivo durante o processo em regime transiente, para um cilindro finito. De acordo com Crank (1975) e Rastogi et al. (1999), a solução analítica é dada por :

$$\frac{C_i - C_{eq-i}}{C_{i0} - C_{eq-i}} = \sum_{n=0}^{\infty} C_{pn} C_{cn} \exp \left[-D_{ef-i} t \left(\frac{q_{pn}^2}{l^2} + \frac{q_{cn}^2}{r^2} \right) \right], \quad (27)$$

onde l é o comprimento característico de um cilindro [m], que consiste na espessura da fatia de yacon, os coeficientes C_{pn} e C_{cn} são calculados por

$$C_{pn} = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_{pn}^2} \quad (28)$$

e

$$C_{cn} = \frac{4\alpha(1+\alpha)}{4+4\alpha+\alpha^2 q_{cn}^2} \quad (29)$$

e q_{pn} e q_{cn} são as raízes positivas não nulas das Eqs. (30) e (31), respectivamente,

$$\tan q_{pn} = -\alpha q_{pn} \quad (30)$$

e

$$\alpha q_{cn} J_0(q_{cn}) + 2J_1(q_{cn}) = 0, \quad (31)$$

sendo $J_0(q_{cn})$ e $J_1(q_{cn})$ as raízes da função de Bessel de zero ordem e primeira ordem, respectivamente. O coeficiente α é dado pela Eq. (32) para a desidratação osmótica e pela Eq. (33) para a secagem convectiva:

$$\alpha = \frac{V_{sol}}{V_{fatia}} \quad (32)$$

e

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{fatia}}, \quad (33)$$

onde V_{sol} é o volume da solução osmótica em cada béquer [m³], V_{fatia} é o volume de uma fatia de yacon unitária [m³] e V_{ar} é o volume de ar dentro do secador [m³].

Os coeficientes de transferência de calor e de massa por convecção, h [W/m²K] e h_m [m/s], respectivamente, foram calculados segundo Holman (1996) por

$$h = \frac{Nuk_{\infty}}{d} \quad (34)$$

e

$$h_m = \frac{h}{\rho_{\infty} C p_{\infty} \left(\frac{\alpha_{\infty}}{D_{i-\infty}} \right)^{2/3}}, \quad (35)$$

onde Nu é o número de Nusselt, k_{∞} é a condutividade térmica do fluido de secagem [W/m.K], d é o diâmetro da fatia de yacon [m], $D_{i-\infty}$ é a difusividade da

espécie i [m^2/s], ρ_∞ é a massa específica do fluido de secagem [kg/m^3], Cp_∞ é o calor específico [J/kgK] e α_∞ é a difusividade térmica [m^2/s], definida por

$$\alpha_\infty = \frac{k_\infty}{\rho_\infty Cp_\infty} . \quad (36)$$

O número de Nusselt (Nu) foi calculado pela Eq. (31) (KNUDSEN e KATZ, 1958), uma correlação empírica que utiliza os números de Reynolds (Re) e Prandtl (Pr) e é aplicada ao escoamento de fluidos sobre cilindros, válida para $Pr \geq 0,7$ e $0,4 \leq Re \leq 4 \cdot 10^5$:

$$Nu = 0,683 Re^{0,466} Pr^{1/3} . \quad (37)$$

Por sua vez, Re e Pr foram calculados segundo Incropera e Dewitt (1990) por:

$$Re = \frac{\rho_\infty v_\infty d}{\mu_\infty} \quad (38)$$

e

$$Pr = \frac{Cp_\infty \mu_\infty}{k_\infty} , \quad (39)$$

onde μ_∞ é a viscosidade do fluido de secagem [Pa.s], v_∞ é a velocidade [m/s] e k_∞ é a condutividade térmica [W/mK].

Para os casos em que a desidratação osmótica é realizada sem agitação da solução, isto é, existe apenas convecção natural, utilizou-se a Eq. (40) (NUSSELT, 1915) para o cálculo de Nu , utilizada para cilindros verticais e válida para o intervalo $Ra \frac{d}{L} \geq 10^{1/4}$:

$$Nu = 0,6 \left(Ra \frac{d}{L} \right)^{1/4} , \quad (40)$$

onde Ra é o número de Rayleigh, calculado segundo Incropera e Dewitt (1990) por:

$$Ra = Gr Pr. \quad (41)$$

Por sua vez, Gr é determinado por (INCROPERA e DEWITT, 1990):

$$Gr = \frac{L^3 g \beta (T - T_{\infty})}{\mu_{\infty}^2}, \quad (42)$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s^2] e β é o coeficiente de expansão térmica da solução osmótica [K^{-1}].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do yacon *in natura*

A análise de composição centesimal indicou que o yacon *in natura* é composto basicamente por água e carboidratos, conforme apresentado na Tab. 4.1. Os resultados são ligeiramente diferentes daqueles reportados por outros autores, contudo tais variações podem ser atribuídas às diferenças de tipo de cultivares, clima, solo, condições de plantio e tempo e temperatura de pós-colheita.

Tabela 4.1 – Composição centesimal do yacon *in natura*.

Componente	Este trabalho	KOTOVICZ, 2011	MICHELS, 2005	MOURA, 2004	HERMANN et al., 1998
Umidade b.u. (%)	89,85±4,18	88,68±1,02	89,8±1,92	90,63	86,4-90,2
Proteínas (%)	0,53±0,06	0,26±0,12	0,45±0,03	0,33	0,3-0,5
Lipídeos (%)	0,57±0,30	0,07±0,04	0,06±0,01	<0,10	0,1-0,5
Minerais (%)	0,31±0,05	0,34±0,00	0,34±0,02	0,39	ND
Carboidratos totais (%)	8,88±4,33	ND	ND	ND	ND
CSS (°Brix)	10,01±1,62	12,16±2,38	9,31±0,93	9,5	ND

Nota: CSS = Conteúdo de sólidos solúveis, ND = não determinado.

4.2 Processo de desidratação osmótica

As condições testadas para o processo de desidratação osmótica seguiram o planejamento fatorial descrito na seção 3.2.8. Vale considerar que a escolha da duração de 2 horas para a desidratação osmótica se deu em função de testes preliminares, os quais revelaram que após este período a absorção de sucralose passa a ser mais importante que a perda de água, o que é indesejável.

A Fig. 4.1 apresenta a variação de massa das fatias de yacon durante a desidratação osmótica. Observa-se que os processos a 50°C acarretaram maior perda de massa em comparação com aqueles conduzidos a 30°C. De fato, as fatias *in natura*, inicialmente com massa (28,6±1,2)g, atingiram o final do processo com massa de (29,0±1,5)g ao se utilizar 30°C *versus* (16,6±3,3)g ao se usar 50°C. Resultados similares, relacionados aos efeitos positivos da temperatura na

perda de peso de frutas e vegetais durante tratamento osmótico, foram reportados em diversos estudos (OZDEMIR et al., 2008; SHUKLA e SINGH, 2007; ISPIR e TOGRUL, 2009; LOMBARD et al., 2008; ANTONIO et al., 2008). Este efeito pode ser explicado pela ação do calor no amolecimento do tecido celular, levando a um aumento em sua permeabilidade e, portanto, facilitando o transporte das moléculas de água do interior do produto para a solução osmótica. Além disso, como relatado por Singh et al. (2007), o decréscimo da viscosidade de uma solução, devido ao efeito térmico, conduz a maiores taxas de difusão de água.

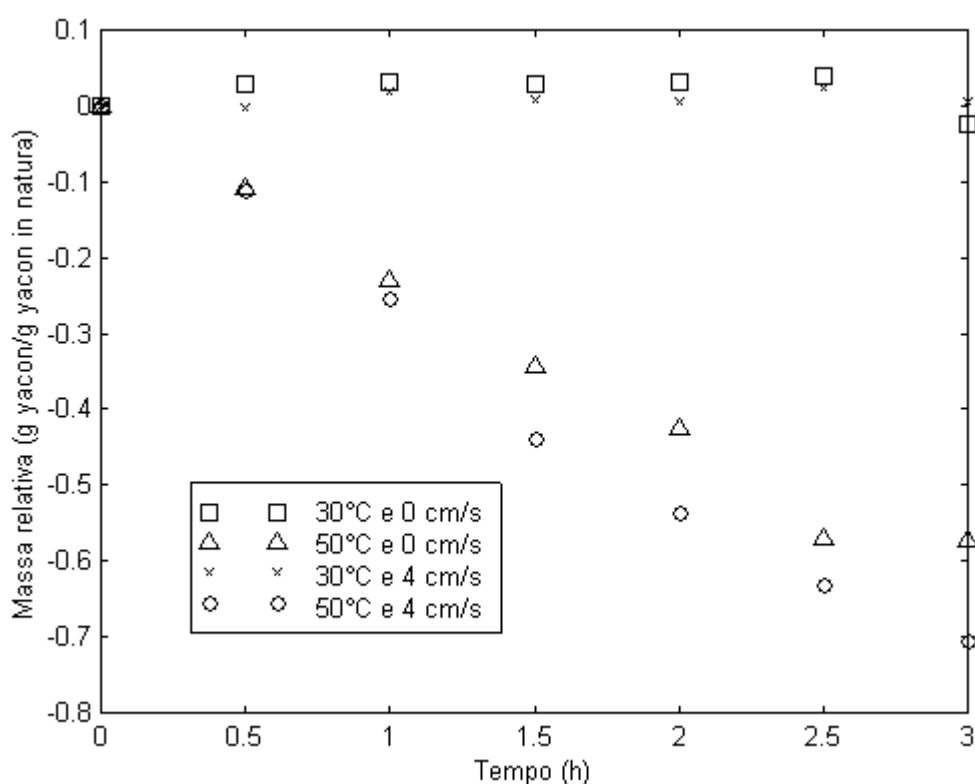


Figura 4.1 – Variação de massa do yacon durante a desidratação osmótica.

Conforme indicam os resultados da Tab. 4.2, com exceção do processo a 30°C e 0 cm/s, o yacon perdeu massa e sofreu redução dos conteúdos de água e de sólidos totais, sendo a variação estatisticamente diferente em função da temperatura da solução. De acordo com a análise estatística, estes parâmetros não foram influenciados pela taxa de agitação. O ganho de água que ocorreu para a amostra tratada a 30°C e 0 cm/s pode ser atribuído ao tamanho da molécula de sucralose, cuja absorção pelo tecido do yacon foi facilitado em decorrência do

aumento da temperatura e/ou do uso de agitação para a solução osmótica nas outras condições experimentais. De fato, a massa molecular da sucralose é de 398 g/mol, enquanto a da água é de 18 g/mol. Entretanto, o conteúdo de umidade permaneceu estatisticamente o mesmo antes e após o tratamento osmótico, para todos os processos, como apresentado na Tab. 4.3. Isto significa que, embora tenha ocorrido variação do conteúdo de umidade devido à desidratação osmótica, esta variação, por ser sutil, não é estatisticamente significativa. O teor de carboidratos totais também não sofreu variação significativa em comparação com a amostra *in natura*, mas os resultados para os diversos testes são diferentes entre si. Os resultados para os teores de proteínas, lipídeos e minerais exibiram comportamento diferente para cada tratamento.

Tabela 4.2 – Variação da massa (ΔM), conteúdo de água (ΔW) e conteúdo de sólidos totais (ΔS) do yacon durante a desidratação osmótica.

Condições de processo	ΔM (g)	ΔW (g)	ΔS (g)
30°C e 0 cm/s	0,87±0,76 ^a	0,98±0,84 ^a	-0,11±0,20 ^a
50°C e 0 cm/s	-12,11±5,06 ^b	-11,03±4,98 ^b	-1,08±0,23 ^b
30°C e 4 cm/s	-0,87±1,91 ^a	-0,67±1,72 ^a	-0,20±0,33 ^a
50°C e 4 cm/s	-14,46±2,90 ^b	-13,29±2,62 ^b	-1,17±0,54 ^b

^{a-b} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Tabela 4.3 – Composição centesimal do yacon *in natura* e submetido a diferentes tratamentos osmóticos.

Amostra	Conteúdo de umidade		Proteínas (%)	Lipídeos (%)	Minerais (%)	Carboidratos totais (%)
	Base úmida (%)	Base seca (g/g yacon)				
<i>in natura</i>	89,85±4,18 ^a	8,86±0,15 ^a	0,53±0,06 ^a	0,34±0,06 ^b	0,29±0,04 ^a	8,98±4,23 ^{ab}
30°C e 0 cm/s	88,81±0,89 ^a	7,93±0,30 ^a	0,42±0,02 ^b	0,31±0,05 ^b	0,28±0,02 ^a	10,18±0,94 ^{ab}
50°C e 0 cm/s	88,31±1,70 ^a	7,55±0,12 ^a	0,42±0,04 ^b	0,34±0,15 ^b	0,21±0,07 ^b	10,73±1,69 ^{ab}
30°C e 4 cm/s	88,97±0,48 ^a	8,07±0,43 ^a	0,40±0,03 ^b	0,29±0,05 ^b	0,16±0,01 ^b	10,18±0,47 ^a
50°C e 4 cm/s	87,00±1,45 ^a	6,69±0,07 ^a	0,51±0,01 ^a	0,52±0,02 ^a	0,33±0,01 ^a	12,15±1,06 ^b

^{a-b} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

A avaliação dos conteúdos de FOS, sucralose e açúcares livres das amostras de yacon antes e após o tratamento osmótico foi realizada por meio de análise

cromatográfica (HPLC). Nas condições cromatográficas empregadas, e com a coluna utilizada, obteve-se sucesso apenas na avaliação do teor de sucralose para as amostras tratadas osmoticamente. Os açúcares sacarose, glicose e frutose não foram detectados nos cromatogramas. Embora a presença de FOS tenha sido identificada em todas as amostras, os picos não se apresentaram bem delimitados, conforme ilustrado na Fig. 4.2, uma vez que os frutooligossacarídeos representam um grupo de açúcares e não um composto isolado

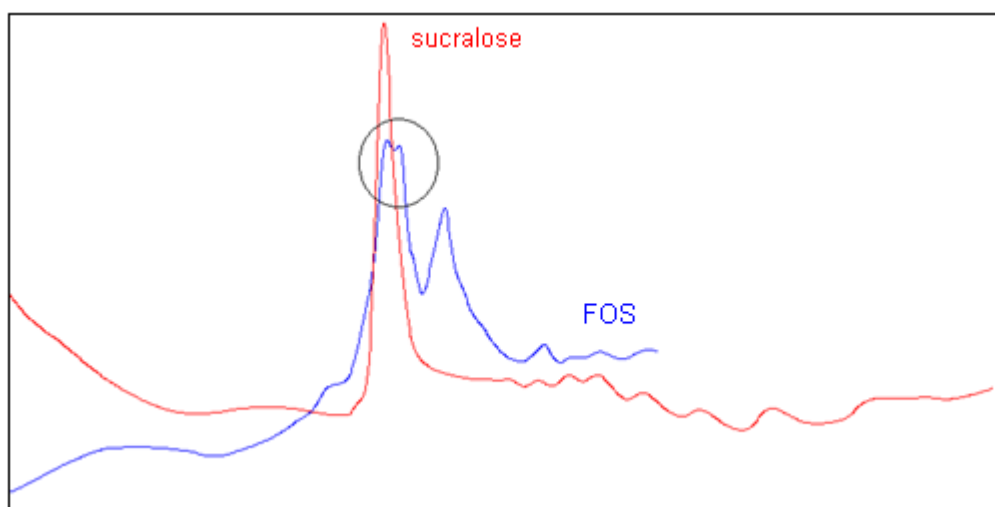


Figura 4.2 – Cromatograma contendo a curva para avaliação de FOS no yacon *in natura* e a curva padrão de 1000 ppm de sucralose.

A Fig. 4.3 apresenta os cromatogramas para a sucralose nas amostras tratadas osmoticamente, os quais possibilitaram a detecção e quantificação do agente osmótico no produto. A Tab. 4.4 apresenta os resultados dos conteúdos de sucralose e de sólidos solúveis do yacon antes e após a desidratação osmótica. Para o cálculo da concentração de sucralose, subtraiu-se a área do pico relativo aos FOS da área do pico cromatográfico correspondente a este edulcorante, uma vez que os tempos de retenção para FOS e sucralose foram os mesmos e a concentração de FOS mostrou-se a mesma em todas as amostras (*in natura* e tratadas osmoticamente). Ocorreu absorção de sucralose em todos os tratamentos, sendo a menor delas para a condição de 50°C e 0 cm/s. Estatisticamente, todas as outras amostras apresentaram a mesma concentração de sucralose. Vale mencionar que o conteúdo de sólidos solúveis pode ser utilizado como um indicativo da absorção de agente osmótico. Contudo, o

conteúdo de sólidos solúveis não sofreu aumento estatisticamente significativo e se mostrou invariável para todos os tratamentos devido ao fluxo multicomponente que toma parte durante a desidratação osmótica. De fato, houve a perda de outros componentes solúveis em água, tais como proteínas e minerais, conforme os dados apresentados na Tab. 4.3 e discutidos anteriormente. Desta maneira, o aumento no conteúdo de sólidos solúveis não pode ser atribuído apenas à absorção de agente osmótico.

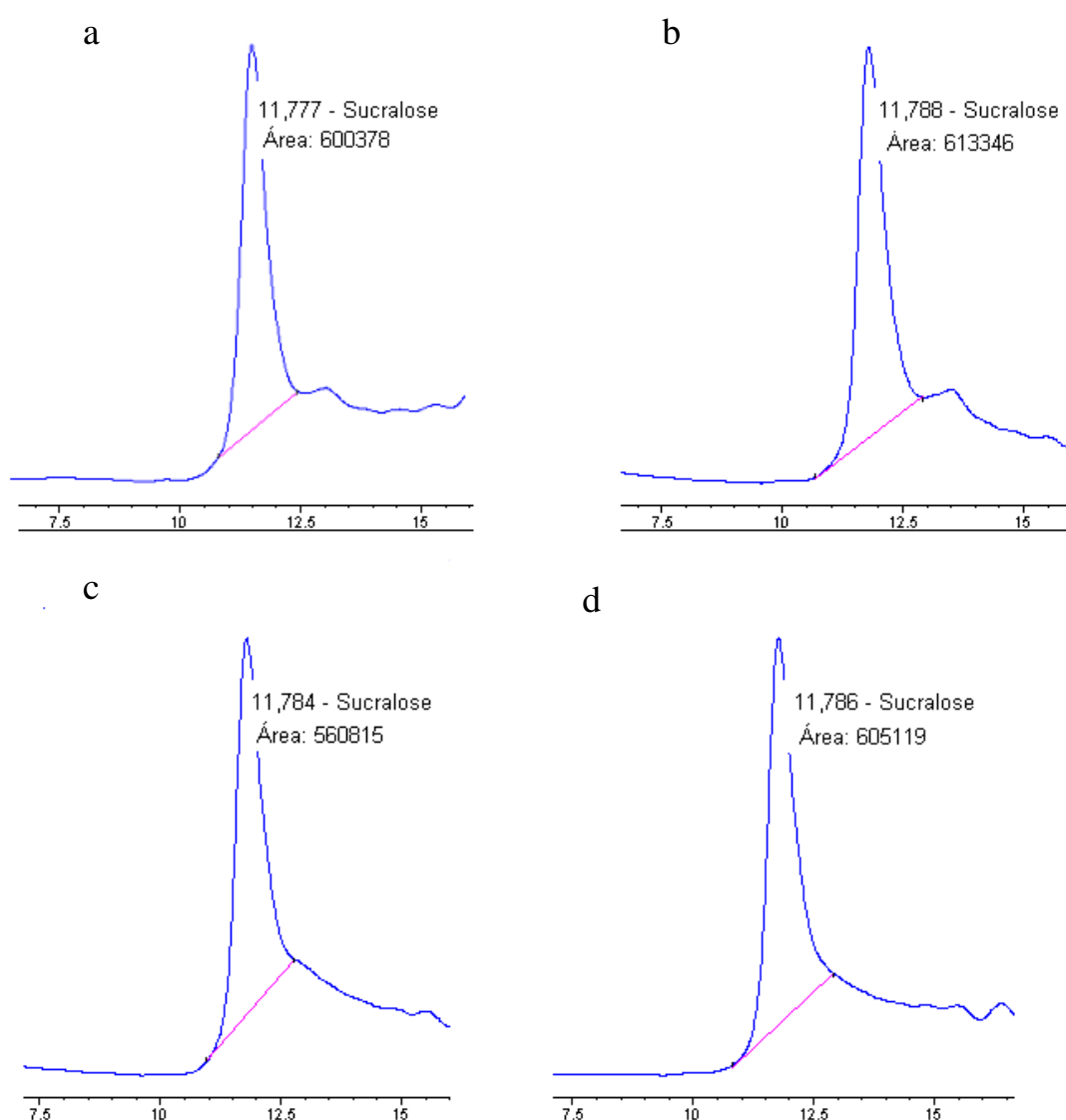


Figura 4.3 – Cromatogramas para a sucralose nas amostras submetidas ao tratamento osmótico sob as condições de: (a) 30°C e 0 cm/s; (b) 30°C e 4 cm/s; (c) 50°C e 0 cm/s; (d) 50°C e 4 cm/s.

Tabela 4.4 – Conteúdo de sólidos solúveis (SS) e de sucralose do yacon submetido à desidratação osmótica.

Condições de processo	SS (°Brix)	Sucralose (mg/g yacon)
amostra <i>in natura</i>	10,01±1,62 ^a	0 ^c
30°C e 0 cm/s	10,81±0,60 ^a	20,26±1,81 ^{ab}
50°C e 0 cm/s	11,94±2,34 ^a	16,82±0,09 ^b
30°C e 4 cm/s	10,92±0,64 ^a	22,86±0,28 ^a
50°C e 4 cm/s	11,58±2,23 ^a	22,23±1,25 ^a

^{a-c} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise colorimétrica e da aferição do diâmetro, conduzidas de acordo com as metodologias apresentadas nas seções 3.2.4 e 3.2.5, respectivamente. Enquanto há ganho de luminosidade (ΔL^*) no yacon tratado a 30°C, ocorre escurecimento nas outras amostras. A mudança de cor (ΔE) também é mais acentuada para as fatias tratadas a 50°C. O escurecimento e a mudança de cor são mais pronunciados sobretudo na condição de 50°C e 4 cm/s. É importante mencionar que os parâmetros ΔL^* e ΔE relacionam-se às condições do processo de secagem osmo-convectiva, dada a influência da temperatura nos fenômenos de escurecimento enzimático e não-enzimático. Na mesma tabela, observa-se também que a temperatura causa efeito estatisticamente significativo no encolhimento e no grau de escurecimento, mas o uso de agitação não exerce influência: fatias tratadas a 50°C são muito menores e mais escuras do que aquelas tratadas a 30°C, independentemente da taxa de agitação utilizada.

Tabela 4.5 – Variação de luminosidade (ΔL^*), mudança de cor (ΔE) e encolhimento (ΔD) do yacon submetido a diferentes tratamentos osmóticos.

Condições de processo	ΔL^*	ΔE	ΔD (%)
30°C e 0 cm/s	1,26±5,00 ^a	18,32±8,74 ^c	6,80±0,92 ^a
50°C e 0 cm/s	-2,88±3,01 ^{ab}	29,15±19,64 ^b	-10,42±3,18 ^b
30°C e 4 cm/s	2,05±3,11 ^a	7,21±4,10 ^{bc}	-0,04±1,56 ^a
50°C e 4 cm/s	-9,94±1,60 ^b	55,90±9,54 ^a	-12,57±2,10 ^b

^{a-b} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

A Fig. 4.4 ilustra o aspecto do yacon antes e após o tratamento osmótico e corrobora os resultados apresentados acima. Fazendo-se uma análise apenas de forma visual, a luminosidade é maior nas amostras tratadas a 30°C do que naquelas tratadas a 50°C, isto é, as fatias de yacon tornaram-se mais translúcidas após submetidas à desidratação osmótica a 30°C, com ou sem uso de agitação. A mudança de cor foi maior para a temperatura de 50°C. O pior resultado em termos de escurecimento e mudança de cor é oferecido pela condição de 50°C e 4 cm/s.

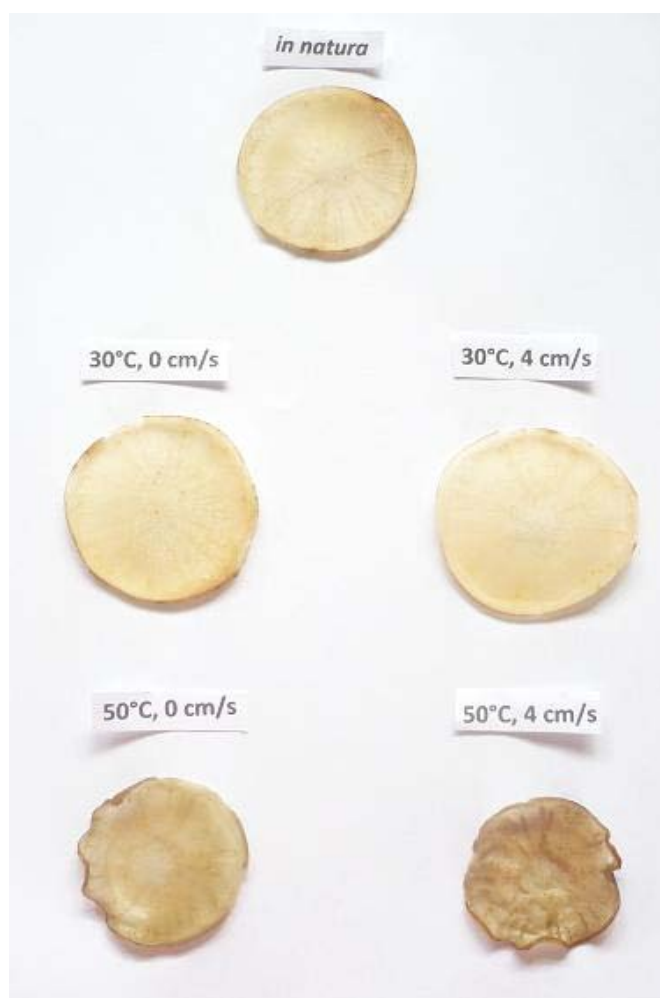


Figura 4.4 – Fatias de yacon *in natura* e após a desidratação osmótica.

A combinação do calor e da agitação (isto é, do impacto entre as várias fatias e entre as fatias e o béquer) levou a distorções angulares (e por vezes, até a aparecimento de fissuras), e maiores graus de encolhimento e escurecimento. Acredita-se que quando as microfissuras foram abertas no tecido celular, devido à combinação entre calor e agitação, a enzima polifenoloxidase foi exposta à

superfície das fatias de yacon, sofrendo os efeitos térmicos e levando a maiores taxas de escurecimento enzimático. Além do fato de que a atividade da polifenoloxidase é diretamente dependente da temperatura, esta aumenta o conteúdo de carbono das melanoidinas formadas pela reação enzimática, intensificando sua pigmentação (MARTINS et al., 2000).

Observou-se ainda que os tratamentos conduzidos a 30°C levaram a um aumento do diâmetro (Fig. 4.5a) e da rigidez das fatias de yacon, de forma desejável, enquanto que o uso da temperatura de 50°C forneceu fatias mais frágeis, mais finas (de menor espessura) e com maior grau de encolhimento radial (Fig. 4.5b). O uso de agitação à temperatura de 50°C claramente produziu maior escurecimento e maiores graus de encolhimento e distorção angular. Portanto, ao se escolher uma condição de processo que alie a maior perda de umidade com o melhor ganho sensorial, em termos de cor e integridade estrutural, o uso da temperatura de 50°C, sobretudo combinada à agitação, não é uma opção válida.

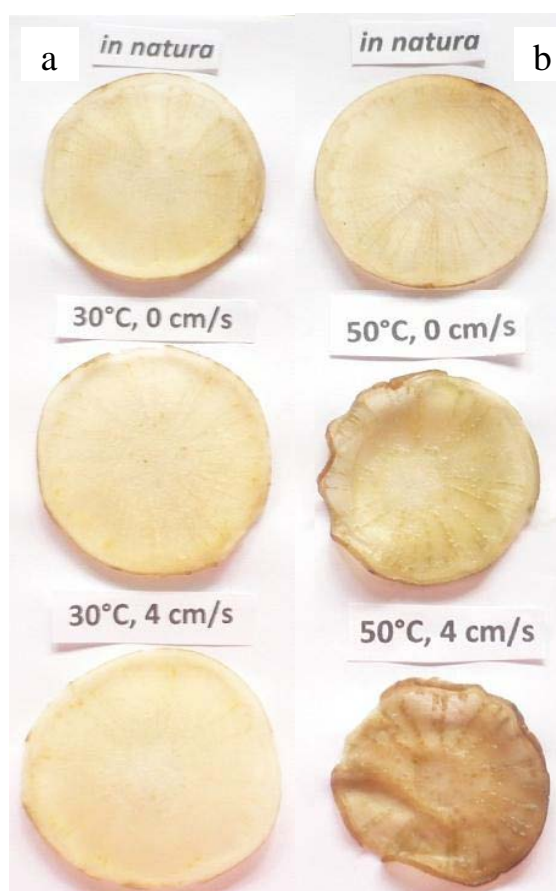


Figura 4.5 – Efeito da desidratação osmótica no aspecto do yacon conduzida à temperatura de: (a) 30°C e (b) 50°C.

Analisando-se em conjunto todos os resultados apresentados nesta seção, percebe-se que a escolha de uma condição de processamento ótima é bastante complexa, dada a necessidade de se atender a vários requisitos relacionados ao rendimento do processo de desidratação osmótica e à qualidade do produto obtido. De forma geral, ao se aplicar um tratamento osmótico, deseja-se remover água do produto com mínima absorção de agente osmótico e ao mesmo tempo reduzir o encolhimento e o grau de escurecimento e promover ganhos de textura e cor. Conforme discutido anteriormente, a elevada taxa de perda de água e a menor taxa de absorção de sucralose das amostras tratadas a 50°C é contrabalanceada pelos prejuízos de cor, textura, integridade estrutural e encolhimento resultantes. Portanto, deve-se optar pelo uso de 30°C para a solução osmótica, com ou sem agitação, para se obter os melhores resultados.

4.3 Processo de secagem convectiva

A variação de massa do yacon durante a secagem convectiva é ilustrada na Fig. 4.6.

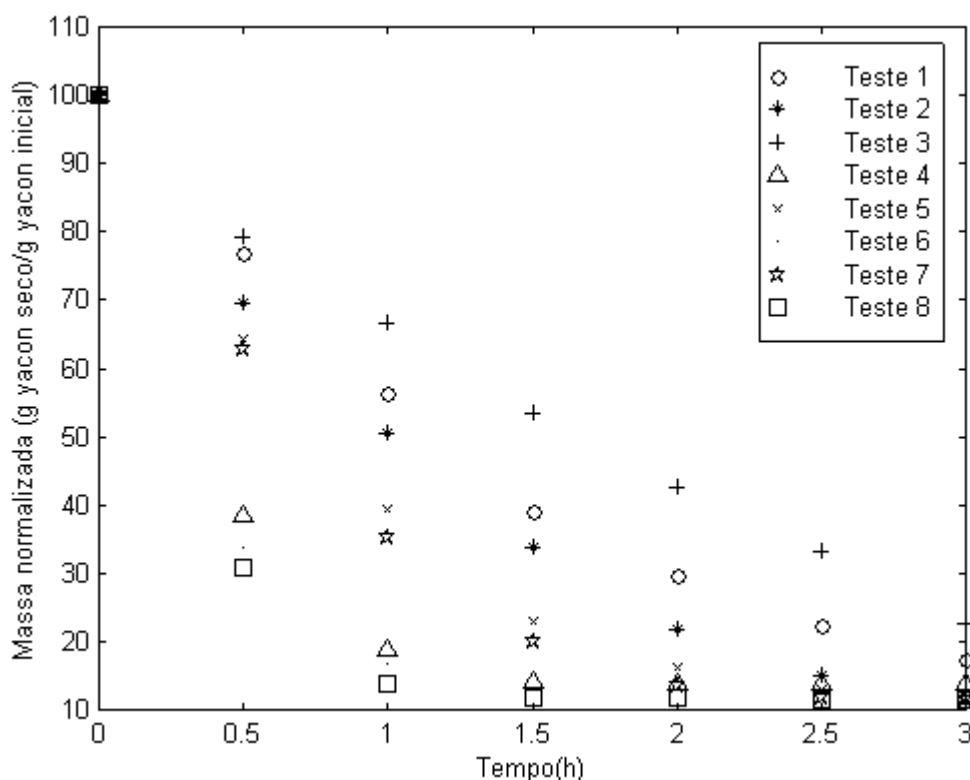


Figura 4.6 – Variação de massa do yacon durante a secagem convectiva.

Ao final das 3 horas de processo, a massa das fatias correspondeu a uma faixa entre $(22,51 \pm 0,91)\%$ e $(9,14 \pm 5,32)\%$ da massa inicial, dependendo do teste. A análise estatística apresentada na Tab. 4.6 indica que, de forma geral, a umidade final do yacon foi menor para os processos que utilizaram 80°C na fase de secagem, como esperado, contudo não foi possível delimitar a influência desempenhada por cada variável de processo isoladamente. Nota-se que, na verdade, a influência é dada pela combinação das condições experimentais.

Tabela 4.6 – Conteúdo de umidade do yacon após 3 horas de secagem osmo-convectiva.

Teste	Condições experimentais	Conteúdo de umidade b.u. (%)
1	30°C , 0 cm/s, 60°C	$34,73 \pm 15,92^a$
2	50°C , 0 cm/s, 60°C	$15,68 \pm 4,52^b$
3	30°C , 4 cm/s, 60°C	$50,45 \pm 4,18^a$
4	50°C , 4 cm/s, 60°C	$3,72 \pm 0,50^b$
5	30°C , 0 cm/s, 80°C	$8,02 \pm 4,86^b$
6	50°C , 0 cm/s, 80°C	$2,94 \pm 0,80^b$
7	30°C , 4 cm/s, 80°C	$6,75 \pm 0,65^b$
8	50°C , 4 cm/s, 80°C	$3,17 \pm 0,08^b$

^{a-b} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Apesar de os testes terem sido conduzidos durante 3 horas, com base em estudos sobre secagem de yacon existentes na literatura, conforme descrito na seção 3.2.10, é possível reduzir o tempo de processo, uma vez que a partir de determinado valor de atividade de água pode-se garantir a estabilidade microbiológica e enzimática do produto sem alterar de maneira significativa seu valor nutricional e atributos sensoriais, como cor e textura. Portanto, para se fazer a seleção do ponto final de secagem, levou-se em consideração dois fatores: a atividade de água e a textura das fatias de yacon. Ao longo da secagem convectiva, a atividade de água do produto assumiu comportamento variável em função das condições experimentais (Fig. 4.7) e foi reduzida de $0,99 \pm 0,00$ até $0,30 \pm 0,01$. Observou-se que quando o produto atingia uma atividade de água ao redor de 0,4, a textura das fatias, analisada de forma visual/tátil, ainda se

encontrava adequada para o consumo. Neste valor de atividade de água, conforme apresentado na Fig. 2.7, a deterioração microbiológica e as reações degradativas, tais como atividade enzimática e oxidação de lipídeos, encontram-se minimizadas. Além deste ponto, isto é, para uma atividade de água menor, as taxas deteriorativas diminuem, contudo as fatias tornaram-se demasiadamente secas e quebradiças, inadequadas para o consumo (Fig. 4.8).

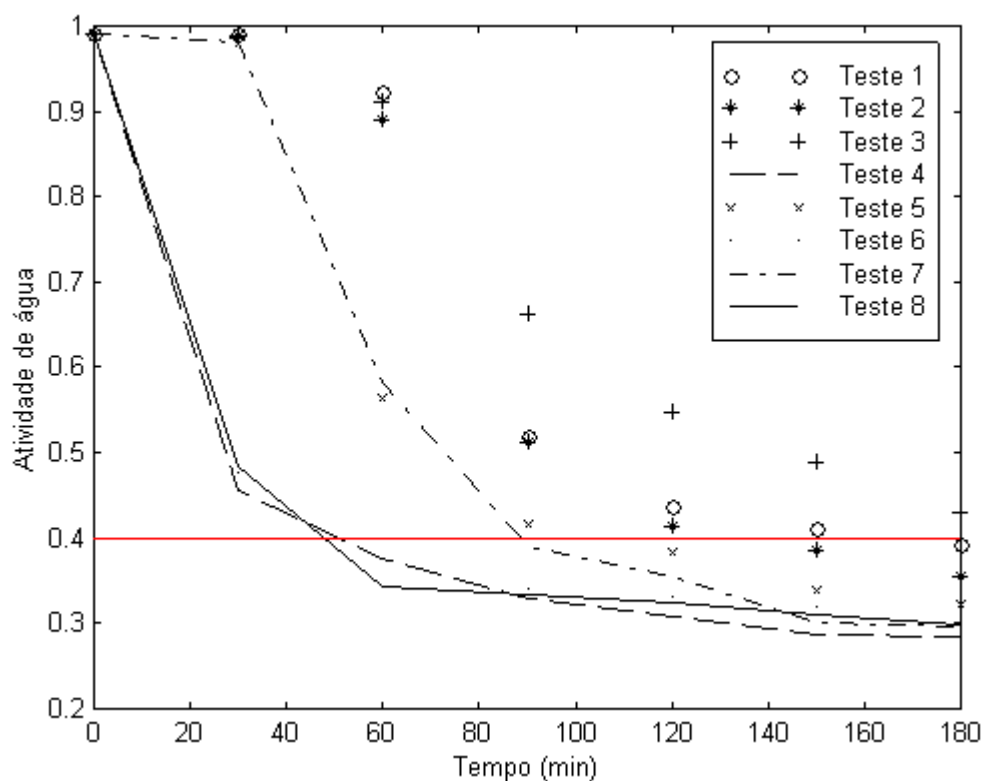


Fig. 4.7 – Atividade de água do yacon durante a secagem convectiva.



Figura 4.8 – Yacon seco até atividade de água próxima de 0,3.

Considerando-se que as determinações de atividade de água foram realizadas a cada 30 minutos de processo, selecionou-se como ponto final de secagem a atividade de água mais próxima de 0,4 entre dois pontos experimentais subsequentes. O procedimento de escolha do ponto final de secagem gerou uma economia importante de tempo de processo e de demanda energética, uma vez que a maioria dos processos passou a durar menos de 180 minutos. Além disso, preservaram-se melhor os atributos sensoriais e nutricionais do yacon seco dos danos térmicos decorrentes da exposição prolongada ao ar aquecido.

Dentro desta perspectiva, cada teste de secagem apresentou um comportamento peculiar, portanto não apenas o tempo de processo para alcançar a atividade de água desejada foi diferente, mas também o conteúdo de umidade correspondente mostrou-se variável (Fig. 4.9).

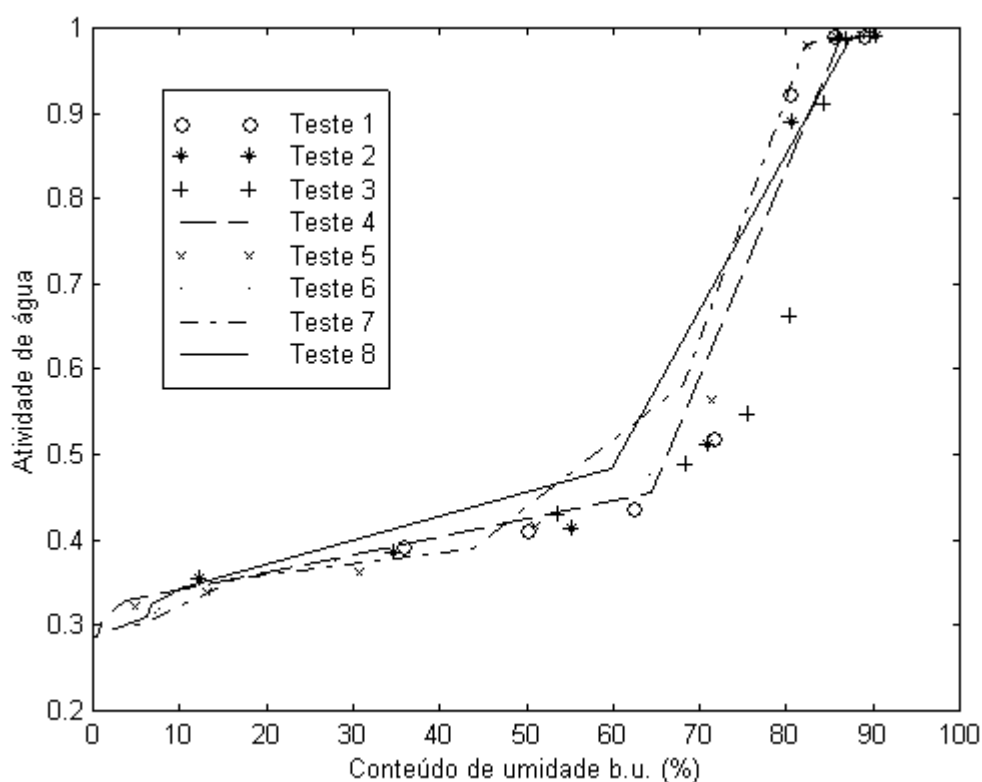


Figura 4.9 – Atividade de água *versus* conteúdo de umidade do yacon.

A Tab. 4.7 apresenta o conteúdo de umidade do yacon seco e o tempo de secagem quando se atinge a faixa de atividade de água selecionada. A umidade

do produto situou-se entre 27% e 60% b.u. e o tempo de processo variou de 60 a 180 minutos para se atingir uma atividade de água entre 0,38 e 0,48.

Tabela 4.7 – Conteúdo de umidade, atividade de água (Aa) e tempo finais para a secagem convectiva do yacon.

Teste	Conteúdo de umidade b.u. (%)	Aa	Tempo (min)
30°C, 0 cm/s, 60°C	34,73±15,92	0,39±0,12	180
50°C, 0 cm/s, 60°C	34,64±1,94	0,39±0,01	150
30°C, 4 cm/s, 60°C	50,45±4,18	0,43±0,03	180
50°C, 4 cm/s, 60°C	26,85±1,85	0,38±0,03	60
30°C, 0 cm/s, 80°C	30,78±6,62	0,38±0,01	120
50°C, 0 cm/s, 80°C	27,98±1,05	0,38±0,04	60
30°C, 4 cm/s, 80°C	43,84±3,87	0,39±0,01	90
50°C, 4 cm/s, 80°C	59,76±6,29	0,48±0,01	60

De acordo com os resultados da Tab. 4.8, se observa que é possível obter um produto seco, de atividade de água próxima de 0,4, com variadas composições centesimais, dependendo das condições de processo selecionadas. Obviamente, durante a secagem ocorre apenas perda de água, ou seja, o conteúdo dos outros nutrientes permanece inalterado após a desidratação osmótica, variando apenas em teor.

Tabela 4.8 – Composição centesimal do yacon seco.

Teste	Água (%)	Proteínas (%)	Lipídeos (%)	Minerais (%)	Carboidratos (%)
30°C, 0 cm/s, 60°C	34,73±15,92	2,44±0,13	1,82±0,33	1,64±0,15	59,39±2,14
50°C, 0 cm/s, 60°C	34,64±1,94	2,43±0,28	1,97±0,94	1,19±0,43	59,78±1,40
30°C, 4 cm/s, 60°C	50,45±4,18	1,69±0,12	1,21±0,26	0,67±0,03	45,89±2,56
50°C, 4 cm/s, 60°C	26,85±1,85	3,21±0,07	3,26±0,19	2,09±0,08	64,59±5,51
30°C, 0 cm/s, 80°C	30,78±6,62	2,59±0,14	1,92±0,35	1,74±0,16	62,97±2,27
50°C, 0 cm/s, 80°C	27,98±1,05	2,68±0,30	2,17±1,03	1,31±0,47	65,92±1,54
30°C, 4 cm/s, 80°C	43,84±3,87	1,92±0,14	1,38±0,29	0,76±0,04	52,11±2,90
50°C, 4 cm/s, 80°C	59,76±6,29	1,77±0,04	1,79±0,10	1,15±0,04	35,56±0,28

Ao se analisar visualmente o aspecto das fatias secas de yacon, conforme apresentado na Fig. 4.10, nota-se diferença de tonalidade, encolhimento e integridade estrutural entre amostras submetidas a diferentes condições de processo. De maneira geral, há uma aparente coloração mais amarelada para as fatias que sofreram tratamento osmótico a 30°C. As amostras tratadas em solução osmótica a 50°C apresentaram tonalidade tendendo para o verde.

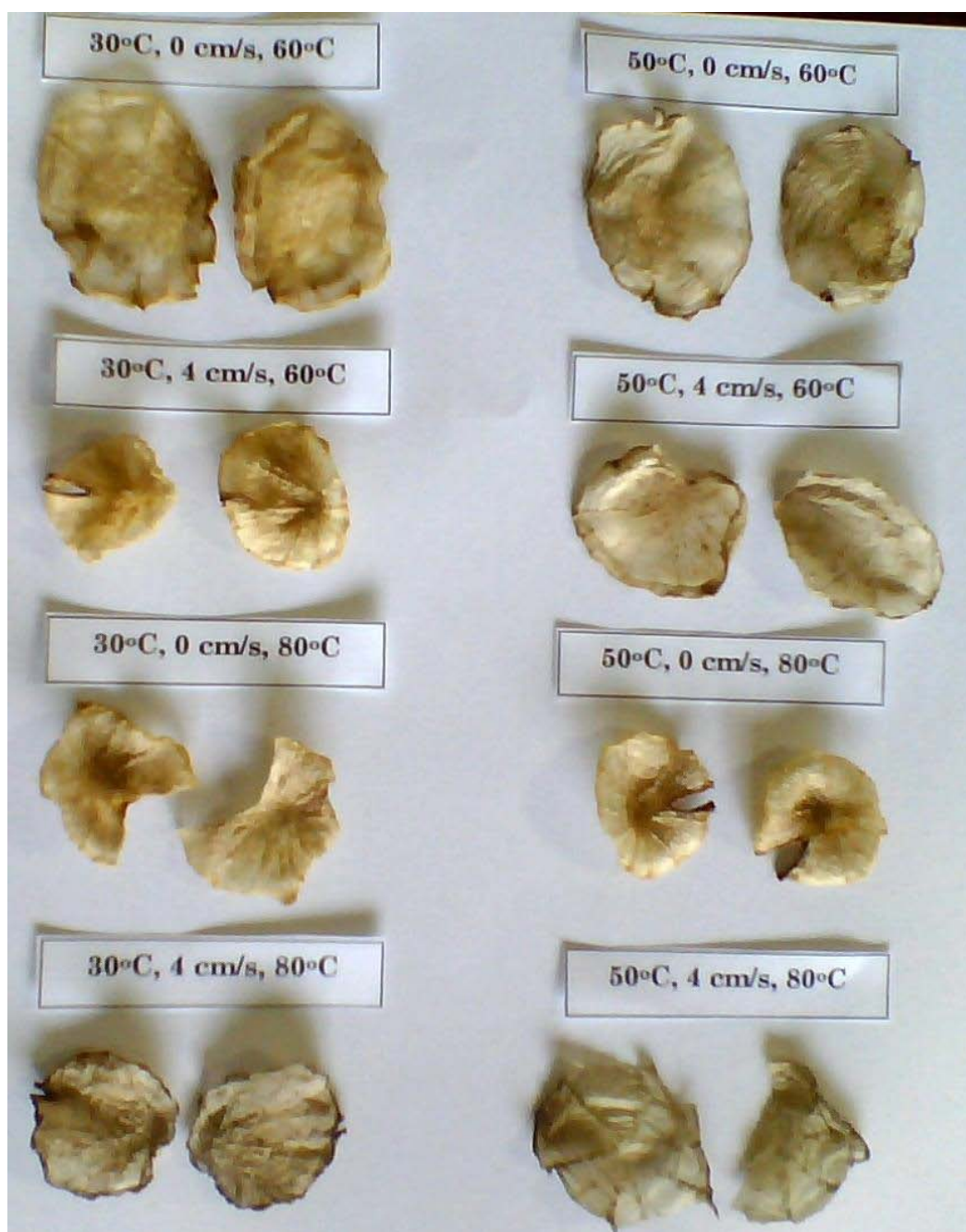


Figura 4.10 – Aparência das fatias de yacon desidratadas sob diferentes condições de processo.

Entretanto, os dados da Tabela 4.9 revelam que as diferenças de cor, grau de escurecimento e encolhimento das amostras secas sob diferentes condições de processo não foram estatisticamente significativas. Embora estes resultados indiquem que ocorre diminuição da luminosidade das amostras após o processamento, o que é indicado pelos valores negativos de ΔL^* , o grau de escurecimento entre as amostras secas sob quaisquer condições de processo foi estatisticamente similar. Além disto, embora exista mudança de cor das amostras em decorrência do processo de secagem osmo-convectiva, uma vez que os valores de ΔE são diferentes de zero, ela é estatisticamente a mesma para todas as condições testadas. Isto significa que é possível escolher aquela(s) condição(ões) que fornece(m) os melhores resultados em termos de perda de umidade, tempo de processo e demanda energética.

Tabela 4.9 – Resultados experimentais para o grau de escurecimento (ΔL^*), a mudança de cor (ΔE) e o encolhimento (ΔD) das fatias secas de yacon.

Teste	ΔL^*	ΔE	ΔD (%)
30°C, 0 cm/s, 60°C	-17,40±0,77 ^a	167,17±73,89 ^a	-27,88±1,56 ^a
50°C, 0 cm/s, 60°C	-17,98±6,57 ^a	161,21±110,74 ^a	-31,78±1,83 ^a
30°C, 4 cm/s, 60°C	-8,44±1,31 ^a	161,54±135,24 ^a	-35,83±5,60 ^a
50°C, 4 cm/s, 60°C	-16,03±2,35 ^a	190,77±31,13 ^a	-42,04±4,27 ^a
30°C, 0 cm/s, 80°C	-7,30±2,93 ^a	205,92±43,02 ^a	-33,80±1,84 ^a
50°C, 0 cm/s, 80°C	-9,92±6,86 ^a	136,69±102,10 ^a	-28,23±5,06 ^a
30°C, 4 cm/s, 80°C	-8,76±0,62 ^a	232,33±108,32 ^a	-31,97±9,81 ^a
50°C, 4 cm/s, 80°C	-15,54±0,01 ^a	153,58±29,39 ^a	-47,90±10,06 ^a

^a Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

É importante ressaltar que o pré-tratamento osmótico trouxe ganhos expressivos de qualidade para o yacon seco, em termos de cor, luminosidade e integridade estrutural, conforme apresentado nas Figs. 4.4 e 4.5. Caso o yacon tivesse sido seco diretamente em estufa, sem a etapa de desidratação osmótica, as fatias apresentariam grau de escurecimento e de distorção angular acentuados, como pode ser observado na Fig. 4.11. Os resultados desta figura são para a secagem convectiva conduzida a 60°C por 120 minutos (a fim de se

atingir atividade de água próxima de 0,4), com pré-tratamento osmótico a 30°C e 0 cm/s no item (a) e sem tratamento osmótico no item (b). Salvo as diferenças inerentes a cada combinação de condições de processo, para efeito de análise de ganho de qualidade esta figura representa todos os outros testes, uma vez que todos eles oferecem melhores resultados, em termos de cor e integridade estrutural do yacon seco, quando se utiliza o pré-tratamento osmótico.



Figura 4.11 – Fatias de yacon desidratadas (a) com o pré-tratamento osmótico e (b) sem o pré-tratamento osmótico.

Até o momento, foram delineadas diferenças estatísticas entre resultados de diferentes tratamentos, baseando-se no teste estatístico de *Tukey*. Uma análise estatística global, isto é, que ilustra os efeitos das variáveis independentes do planejamento experimental descrito na seção 3.2.8 – temperatura da solução osmótica (x_1), agitação da solução osmótica (x_2) e temperatura de secagem (x_3) – nos atributos de qualidade do produto final – conteúdo de umidade (y_1), mudança de cor (y_2) e conteúdo de sólidos solúveis (y_3) –, é apresentada na Fig. 4.12. Esta análise, realizada pelo teste t de *Student*, revela que o conteúdo de umidade (y_1) é influenciado apenas pela temperatura de secagem. De fato, conforme observado nas Tabs. 4.3 e 4.6, o conteúdo de umidade do yacon *in natura* foi estatisticamente o mesmo em comparação com as amostras que receberam o tratamento osmótico, sob quaisquer condições de processo, enquanto que após 3 horas de secagem convectiva, houve redução do conteúdo de umidade, o qual variou de forma estatisticamente significativa em função da temperatura de secagem.

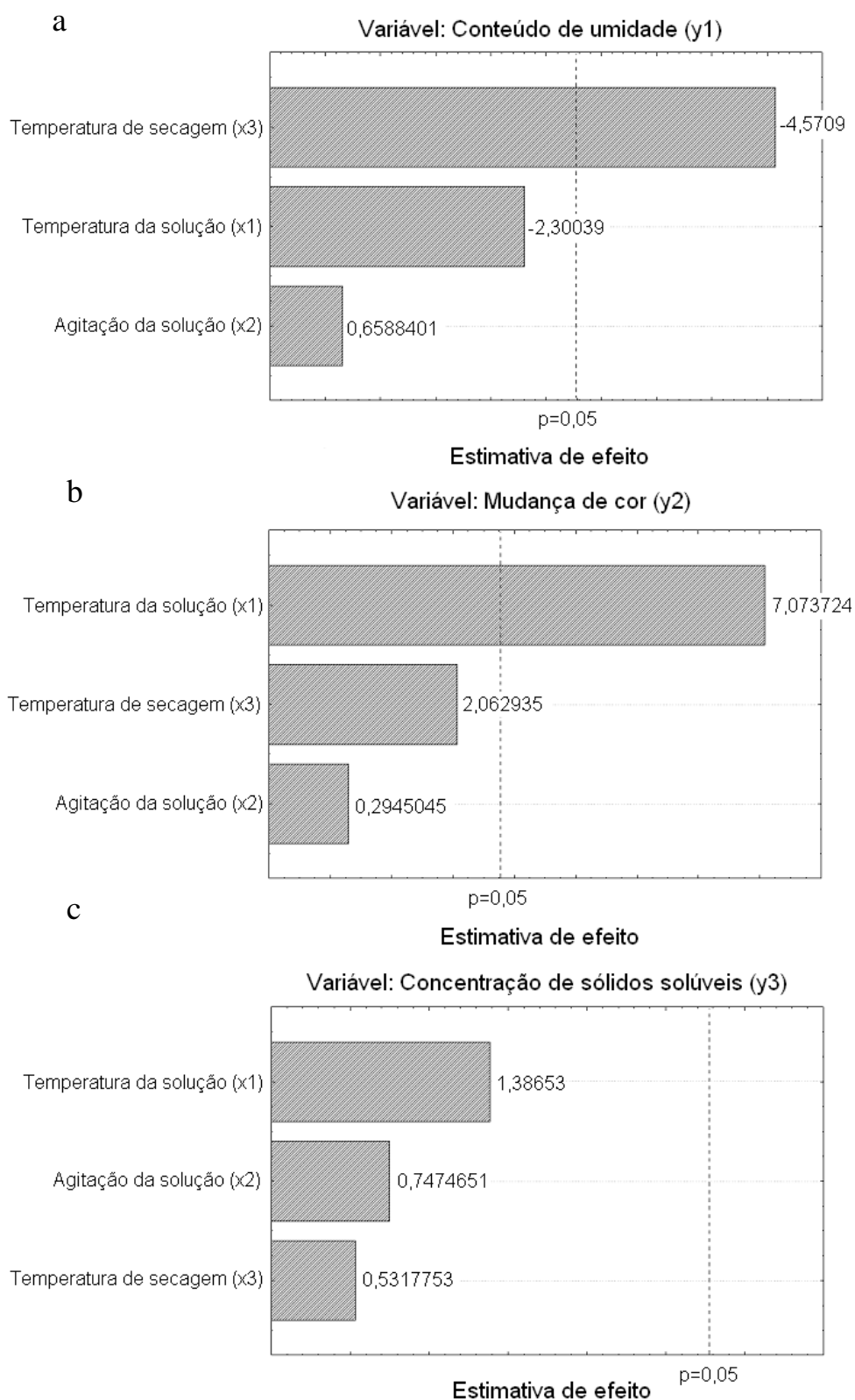


Figura 4.12 – Gráficos de Pareto para ilustração dos efeitos das variáveis estudadas nos atributos de qualidade do yacon a 95% de intervalo de confiança: (a) y1 = conteúdo de umidade; (b) y2 = mudança de cor; e (c) y3 = concentração de sólidos solúveis.

A mudança de cor (y_2), por sua vez, foi influenciada apenas pela temperatura da solução osmótica, o que é corroborado pelos resultados das Tabs. 4.5 e 4.9. Embora tenha ocorrido mudança de cor muito maior durante a etapa de secagem convectiva, em decorrência das maiores temperaturas de processo, houve diferença estatisticamente significativa entre amostras tratadas a condições diferentes apenas na desidratação osmótica. Após a secagem convectiva, todas as amostras apresentaram resultados similares para este parâmetro.

Vale mencionar que o processo de secagem osmo-convectiva poderia atribuir variações de cor e luminosidade às fatias de yacon devido à influência da temperatura de processo nos fenômenos de escurecimento enzimático e não-enzimático. O escurecimento enzimático pode ocorrer devido à ação das enzimas POD e PPO nos compostos fenólicos do yacon na presença de oxigênio. Portanto, esta reação poderia ocorrer na etapa de preparo das amostras para o tratamento osmótico, isto é, durante o descasque e fatiamento dos tubérculos, e durante a fase de secagem convectiva, situações onde há contato das fatias de yacon com o ar. Durante o processo de secagem osmo-convectiva, o pigmento formado antes do tratamento osmótico e/ou durante a secagem em estufa, a melanoidina, poderia ter sua intensidade aumentada em função da temperatura (ARAÚJO, 2004). O escurecimento não-enzimático poderia ocorrer durante o processo estudado devido à reação de Maillard entre carboidratos não-redutores e aminoácidos. para as duas etapas do processo. A concentração de sólidos solúveis (y_3), a qual foi avaliada antes e após o tratamento osmótico, não foi influenciada por nenhuma das condições de processo na faixa de valores utilizada neste estudo, o que está conforme os dados apresentados na Tab. 4.4, os quais indicam que este parâmetro se mostrou invariável para amostras tratadas a diferentes condições de desidratação osmótica.

4.4 Modelagem matemática do processo de secagem osmo-convectiva

A fim de se obter os perfis numéricos de umidade, temperatura e absorção de sucralose durante a secagem osmo-convectiva do yacon, foi necessário determinar as propriedades termofísicas do produto e os parâmetros dos processos de transferência de calor e de massa. As propriedades termofísicas do

yacon durante a desidratação osmótica, obtidas de forma experimental, são apresentadas na Tab. 4.10. Os desvios padrão mostram que a variação das propriedades ao longo do tratamento é sutil, em decorrência da pequena variação de umidade durante este processo, sendo de 0,6% a 6,3% para a massa específica, de 1,1% a 9,5% para o calor específico, e de 1,8% a 19,1% para a condutividade térmica. As maiores variações ocorreram para o processo conduzido a 50°C e 4 cm/s, uma vez que esta é a condição que leva às maiores taxas de transferência de água e de sólidos.

Tabela 4.10 – Propriedades termofísicas do yacon durante a desidratação osmótica.

Processo	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kg�C)	Condutividade térmica (W/m�C)
30�C e 0 cm/s	931,33�12,01	4171,60�69,33	0,55�0,01
30�C e 4 cm/s	1053,53�6,70	3690,58�48,94	0,53�0,06
50�C e 0 cm/s	1056,36�20,57	3491,08�331,10	0,57�0,01
50�C e 4 cm/s	972,00�158,39	3477,47�393,68	0,47�0,09

Para a secagem convectiva, devido à grande perda de água durante o processo, as variações das propriedades termofísicas foram maiores, representando de 5,1% a 17,3% para a massa específica, de 9,4% a 51,2% para o calor específico e de 8,2% a 41,9% para a condutividade térmica, segundo os resultados obtidos experimentalmente por meio da mesma metodologia utilizada para a fase de tratamento osmótico. É evidente na Fig. 4.13 a forte influência da umidade do produto nas propriedades termofísicas, isto é, os resultados são os mesmos para um dado conteúdo de umidade, independentemente das condições de processo utilizadas. A massa específica variou de 1037 kg/m³ a 1644 kg/m³, aumentando ao longo do processo, uma vez que os sólidos que constituem um alimento apresentam massa específica maior do que a da água.   medida que a água foi removida do yacon, o calor específico (1304 J/kg C a 3919 J/kg C) e a condutividade térmica (0,21 W/m C a 0,52 W/m C) diminuíram.

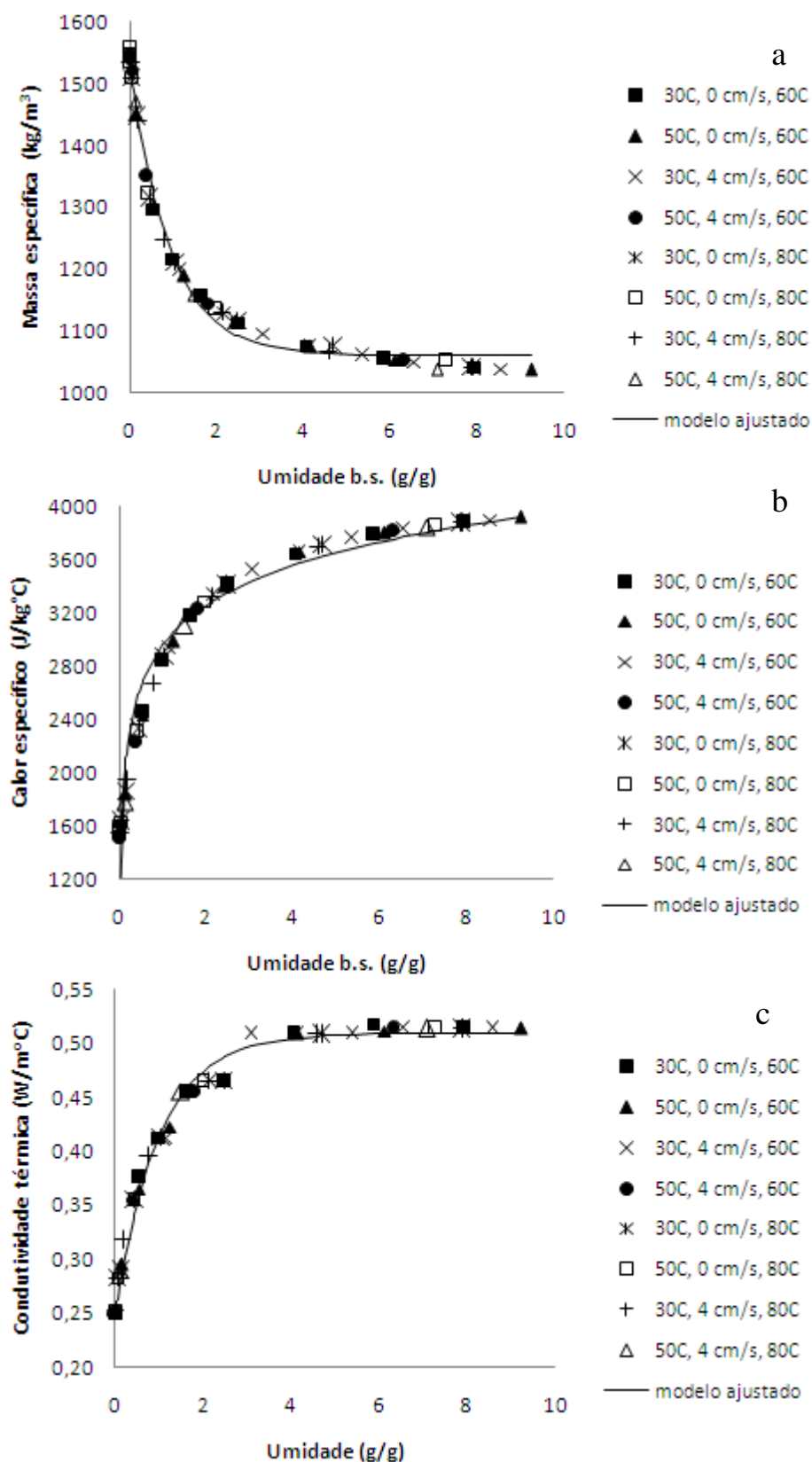


Figura 4.13 – Propriedades termofísicas do yacon durante a secagem convectiva em função da umidade: (a) massa específica; (b) calor específico; (c) condutividade térmica.

Aos dados experimentais foram ajustados modelos de primeira ordem (Tab. 4.11), obtidos por regressão não-linear, que descrevem as propriedades termofísicas do yacon em função de seu conteúdo de umidade. Os altos coeficientes de correlação indicam que estes modelos podem ser utilizados com precisão para o cálculo das propriedades termofísicas do yacon, mesmo se cultivado em regiões e condições diferentes da matéria-prima utilizada no presente trabalho, visto que, conforme os dados apresentados na Tab. 4.1, as variações de umidade não são grandes entre raízes de yacon obtidas de diferentes fontes.

Tabela 4.11 – Modelos matemáticos ajustados para o cálculo das propriedades termofísicas do yacon em função da umidade.

Propriedade	Equação	R ²
Massa específica (kg/m ³)	$\rho(X) = 1525,18 - 466,07 \times (1 - \exp(-X/0,9325))$	0,9896
Calor específico (J/kg·°C)	$Cp(X) = 433 \ln(X) + 2959$	0,9660
Condutividade térmica (W/m·°C)	$k(X) = 0,25 + 0,2594 \times (1 - \exp(-X/1,0034))$	0,9883

As propriedades termofísicas do yacon durante a secagem convectiva também foram calculadas a partir da composição centesimal, variável ao longo do processo. Os resultados foram muito similares àqueles obtidos experimentalmente (Fig. 4.14), o que sugere que as duas metodologias são eficientes para prever a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica do yacon. A similaridade entre os resultados também corrobora a grande influência do conteúdo de umidade nas propriedades termofísicas do yacon, uma vez que os modelos obtidos por meio da primeira abordagem apenas consideraram o conteúdo de umidade, enquanto a segunda levou em conta toda a composição centesimal do produto. Assim, as correlações empíricas obtidas neste trabalho são de importante valia no estudo de processos térmicos de yacon, uma vez que são escassos os dados existentes na literatura acerca deste produto.

É importante mencionar que o acoplamento entre as transferências de calor e de massa se dá por meio das propriedades termofísicas do yacon, cujos valores utilizados no modelo são variáveis ao longo do processo em função da umidade do produto (Tabs. 4.10 e 4.11).

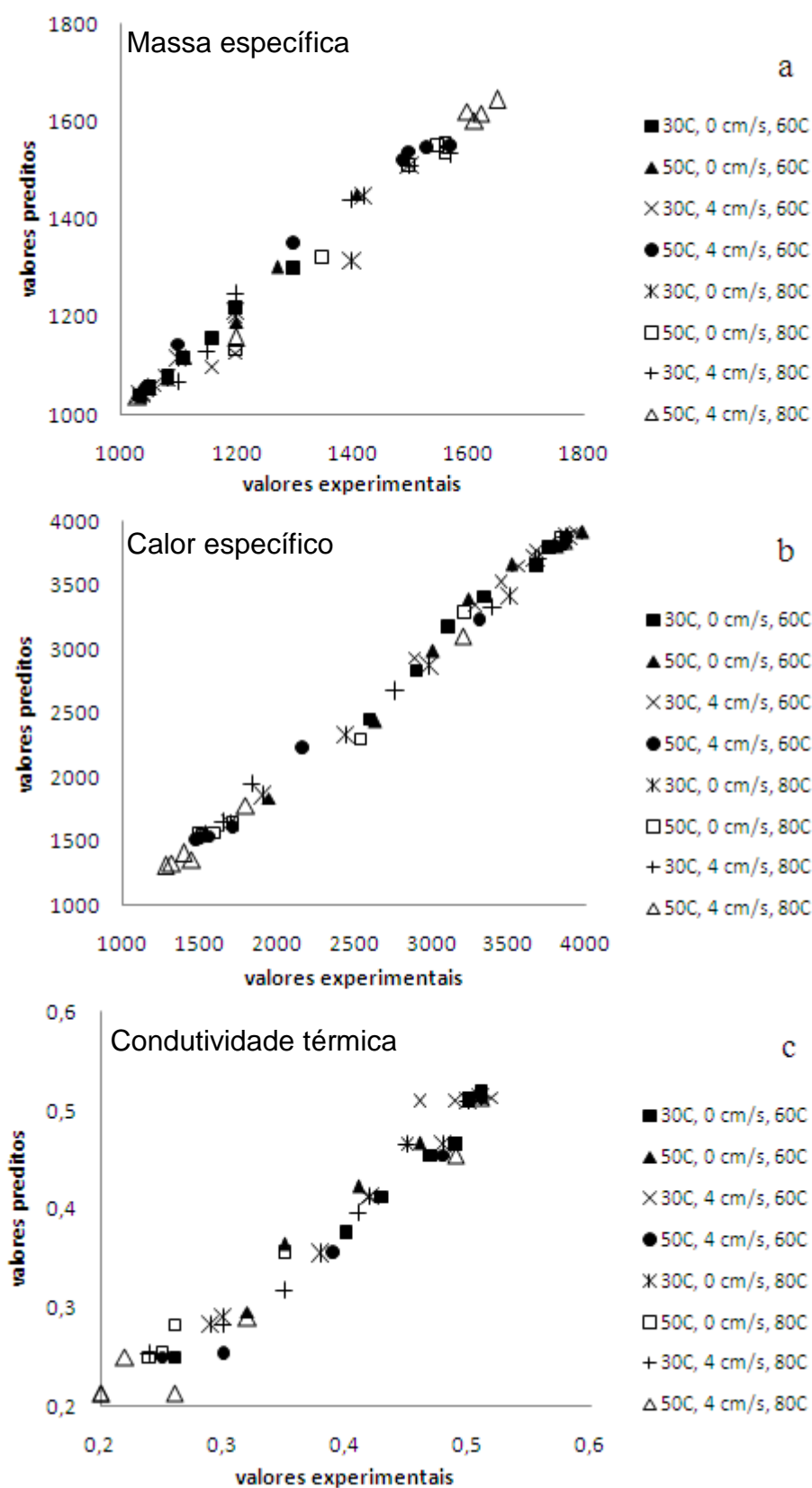


Figura 4.14 – Comparação entre as propriedades termofísicas do yacon durante a secagem convectiva obtidas por diferentes metodologias: (a) massa específica, (b) calor específico, e (c) condutividade térmica.

Os coeficientes de difusão (para a água e a sucralose) e os parâmetros de secagem, obtidos de acordo com a metodologia descrita na seção 3.2.12, são apresentados nas Tabs. 4.12 e 4.13, para a desidratação osmótica e a secagem convectiva, respectivamente.

Os dados da Tab. 4.12 indicam que os coeficientes de transferência de massa (h_m) são diferentes para cada tratamento osmótico, enquanto a transferência de calor (h) depende fundamentalmente da temperatura da solução. Todos os coeficientes difusivos apresentaram diferença significativa entre amostras submetidas a tratamentos diferentes. Na Fig. 4.15 verifica-se que a taxa agitação da solução osmótica, por ser baixa (0,04 m/s), de fato não aumentou as taxas de transferência de calor, isto é, os perfis de temperatura das fatias de yacon dependeram apenas da temperatura da solução osmótica. Este resultado é corroborado pelos coeficientes h , que são estatisticamente iguais para os processos conduzidos à mesma temperatura com e sem uso de agitação.

Tabela 4.12 – Coeficientes de transferência de calor e de massa para a desidratação osmótica.

Processo	h (W/m°C)	h_m água (m/s)	h_m sucralose (m/s)	D_{ef} água (m²/s)	D_{ef} sucralose (m²/s)
30°C e 0 cm/s	8,78 ^b	$4,23 \cdot 10^{-3b}$	$5,37 \cdot 10^{-4b}$	$8,22 \cdot 10^{-9a}$	$1,81 \cdot 10^{-9c}$
30°C e 4 cm/s	11,01 ^b	$5,54 \cdot 10^{-3b}$	$7,03 \cdot 10^{-4b}$	$4,16 \cdot 10^{-9c}$	$9,41 \cdot 10^{-10d}$
50°C e 0 cm/s	541,33 ^a	$2,18 \cdot 10^{-1a}$	$2,76 \cdot 10^{-2a}$	$4,37 \cdot 10^{-9b}$	$3,38 \cdot 10^{-9a}$
50°C e 4 cm/s	503,47 ^a	$2,53 \cdot 10^{-1a}$	$3,21 \cdot 10^{-2a}$	$2,03 \cdot 10^{-9d}$	$1,99 \cdot 10^{-9b}$

^{a-d} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Os resultados da Tab. 4.13, por sua vez, indicam que existe diferença estatisticamente significativa para os parâmetros h e D_{ef} entre os processos de secagem convectiva conduzidos a distintas condições experimentais. O parâmetro h_m , entretanto, é invariável para todos os tratamentos. Devido à baixíssima viscosidade do ar em comparação com a solução de sucralose, o coeficiente de transferência de calor chega a ser 50 vezes maior na desidratação osmótica do que na secagem, mas os coeficientes difusivos são cerca de 10 vezes maiores (Tabs. 4.12 e 4.13).

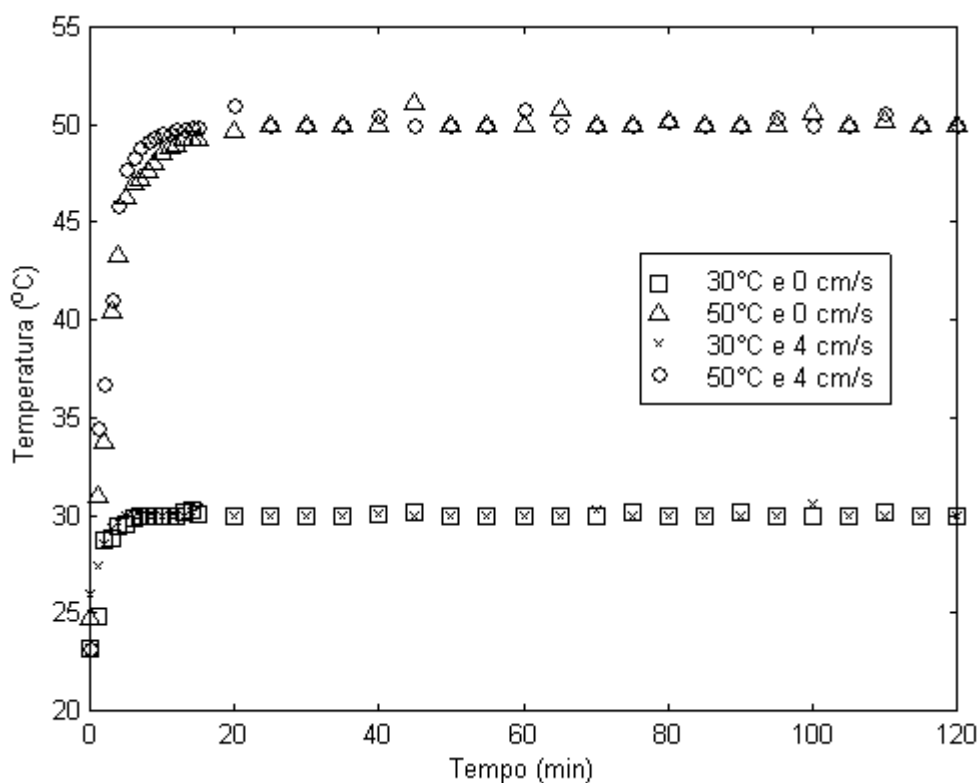


Figura 4.15 – Variação experimental de temperatura durante a desidratação osmótica do yacon.

Tabela 4.13 – Coeficientes de transferência de calor e de massa para a secagem convectiva.

Processo	h (W/m ² °C)	h_m água (10 ² ·m/s)	D_{ef} água (m ² /s)
30°C, 0 cm/s, 60°C	9,82 ^d	1,03 ^a	9,27e-11 ^f
50°C, 0 cm/s, 60°C	9,86 ^{cd}	1,03 ^a	1,52e-10 ^e
30°C, 4 cm/s, 60°C	9,96 ^{bc}	1,04 ^a	5,79e-11 ^g
50°C, 4 cm/s, 60°C	10,17 ^a	1,07 ^a	5,58e-10 ^a
30°C, 0 cm/s, 80°C	10,19 ^a	1,11 ^a	1,90e-10 ^d
50°C, 0 cm/s, 80°C	9,98 ^b	1,09 ^a	1,87e-10 ^d
30°C, 4 cm/s, 80°C	9,60 ^e	1,05 ^a	2,37e-10 ^c
50°C, 4 cm/s, 80°C	9,88 ^{bcd}	1,08 ^a	2,54e-10 ^b

^{a-g} Médias da mesma coluna com diferentes caracteres são estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Para verificar a validade do modelo matemático, os resultados simulados computacionalmente, de acordo com o algoritmo numérico ilustrado na Fig. 4.16,

foram comparados com os experimentais.

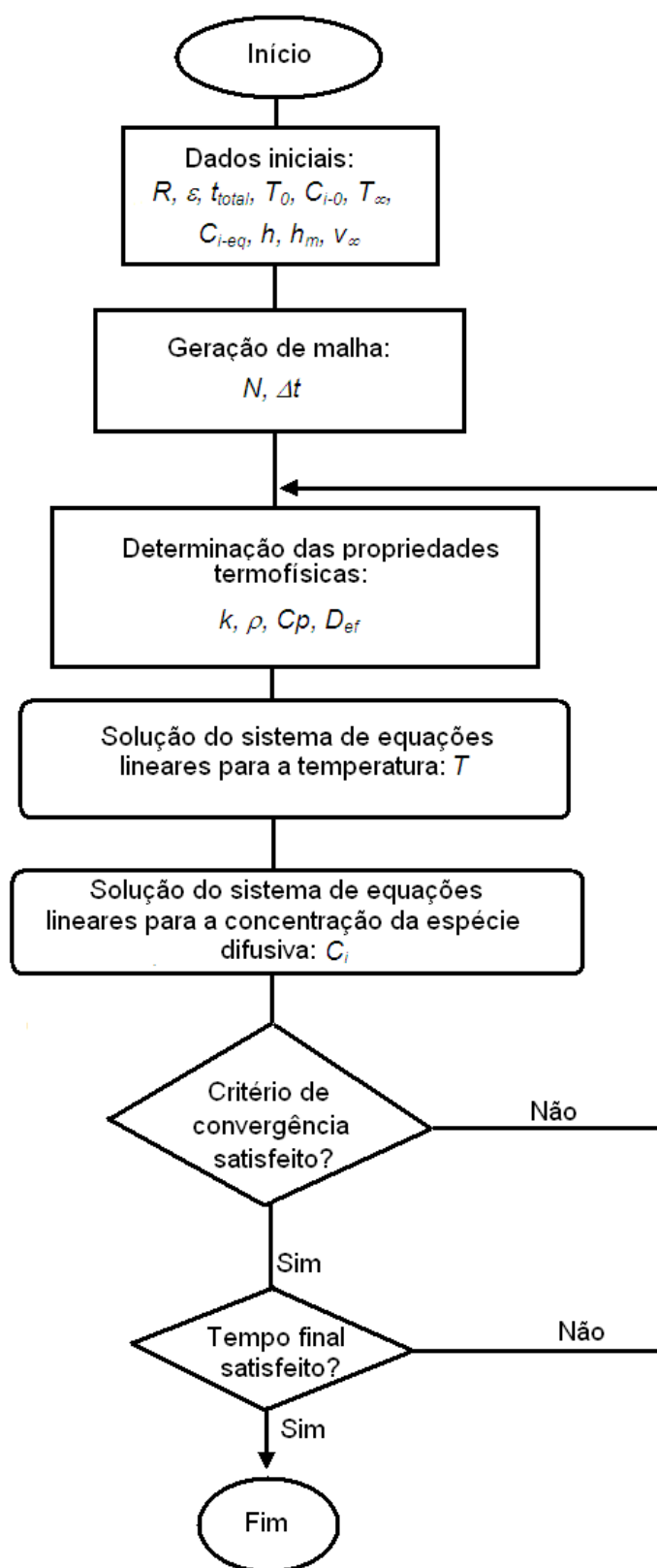


Figura 4.16 – Algoritmo numérico.

Para haver reprodução dos resultados, são necessários diversos dados, tais como raio e espessura da fatia de yacon, tempo de processo, temperatura e velocidade do fluido de secagem, coeficientes de transferência de calor e de massa, coeficientes difusivos, temperatura e concentrações iniciais do produto e propriedades termofísicas do yacon e do fluido de secagem. Na etapa de geração da malha, define-se o número de elementos finitos desejado e o intervalo de tempo de resolução do problema, que neste caso foi de 0,01 s. O formato dos elementos é criado automaticamente pelo software. Como a resolução numérica de um problema deve independer da malha computacional utilizada, a simulação foi realizada com o uso de três malhas diferentes, compostas pelo seguinte número de elementos triangulares, respectivamente: (1) 612, (2) 116 e (3) 40.

É importante mencionar que a comparação entre resultados numéricos e experimentais refere-se a um ponto específico da fatia de yacon, conforme indicado na Fig. 4.17. Para a comparação dos resultados de temperatura, utilizou-se um ponto localizado na borda da fatia (Fig. 4.7a), que corresponde ao local onde foi inserido um dos termopares durante o processo. Para os dados de umidade e absorção de sucralose, o ponto selecionado localiza-se no centro médio de uma das metades da fatia (Fig. 4.7b), visto que neste local os perfis são mais homogêneos em comparação às bordas.

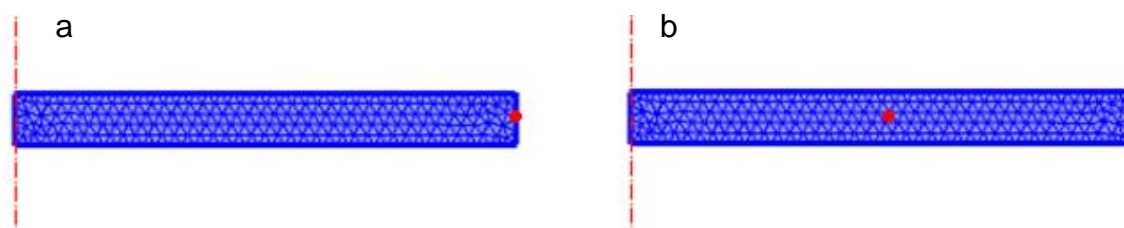
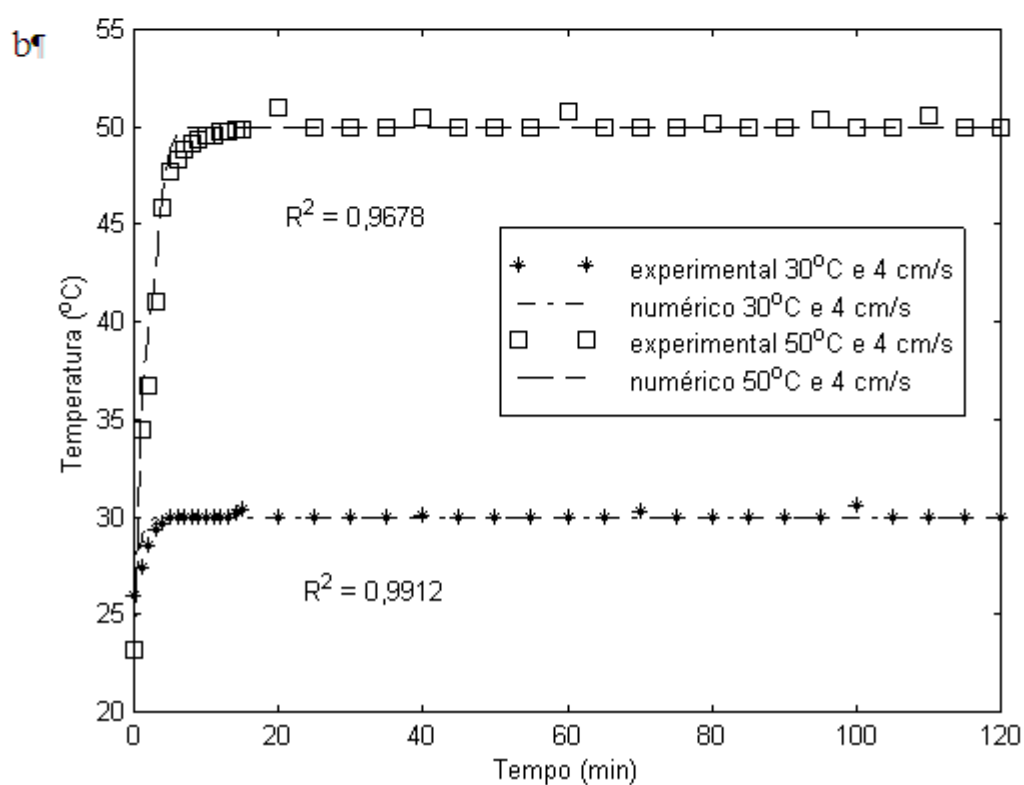
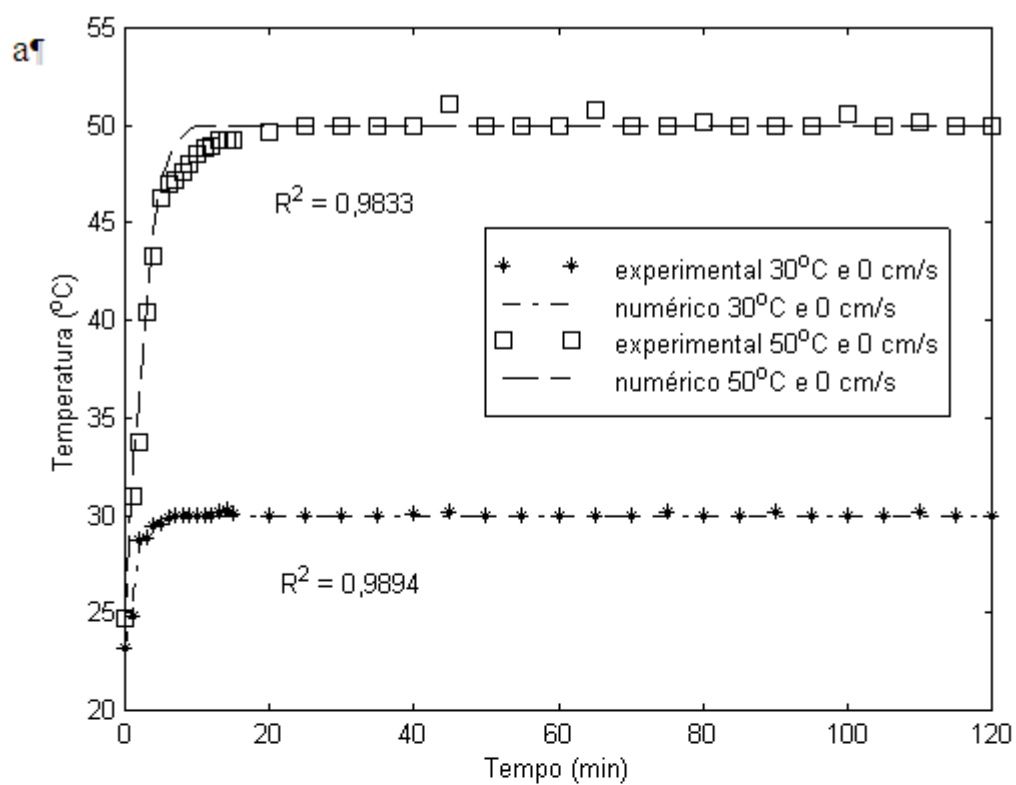


Figura 4.17 – Indicação do ponto da fatia para o qual foram comparados os resultados numéricos e experimentais: (a) para a temperatura; (b) para a umidade e a absorção de sucralose.

Os resultados numéricos foram obtidos com o uso da malha (1), criada automaticamente pelo COMSOL. A Fig. 4.18 ilustra a variação de temperatura do yacon durante a desidratação osmótica e indica que a correlação entre resultados numéricos e experimentais é satisfatória ($R^2 > 0,86$).



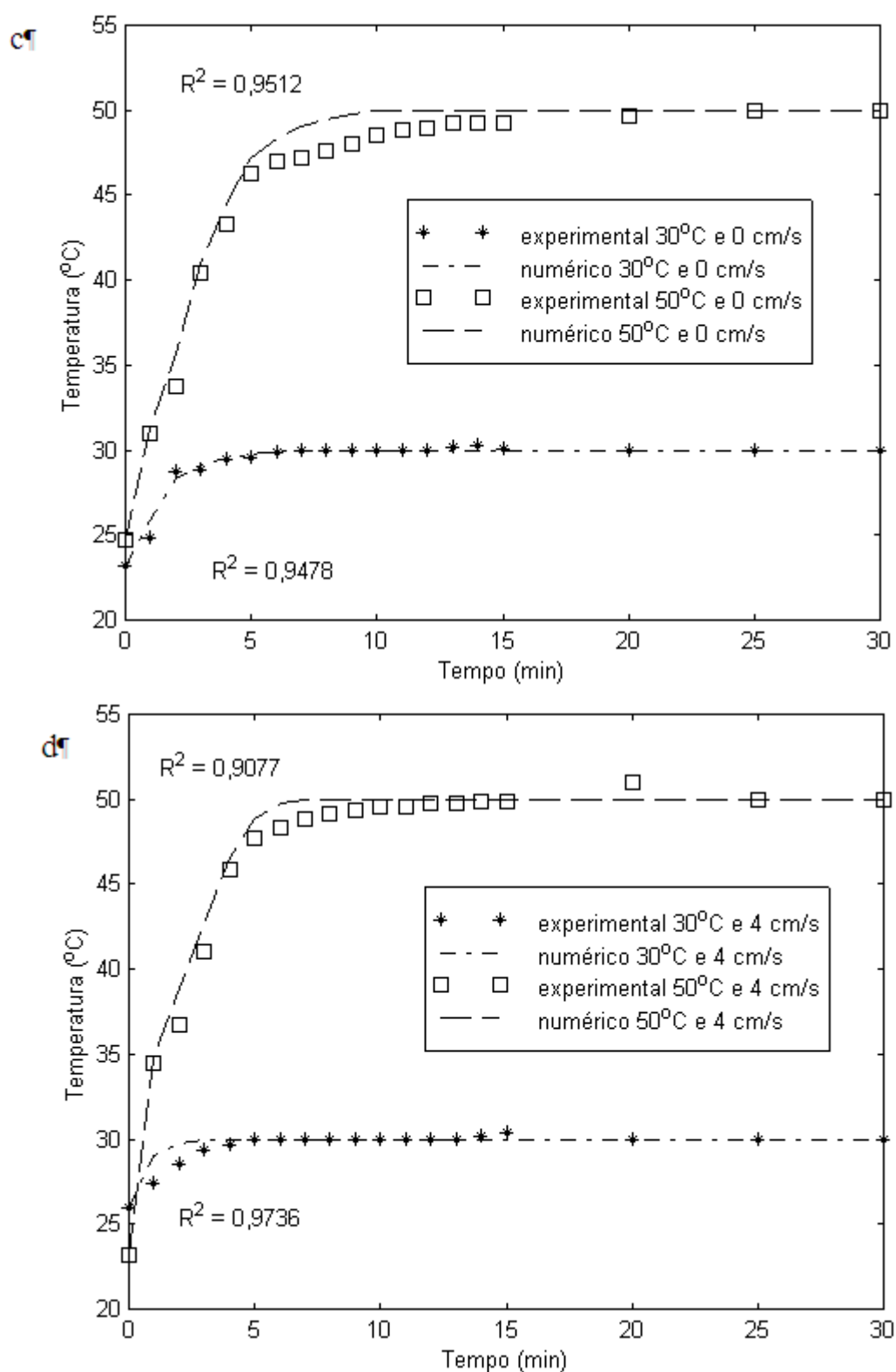


Figura 4.18 – Variação de temperatura do yacon durante a desidratação osmótica conduzida: (a) sem agitação; (b) com agitação; (c) sem agitação no início do processo; (d) com agitação no início do processo.

Conforme ilustrado nas Figs. 4.18c e 4.18d, o modelo também descreve adequadamente a parte transiente do processo, em que o produto ainda não atingiu o equilíbrio térmico com a solução, embora existam algumas diferenças entre dados simulados e experimentais. A Fig. 4.19 indica que existe diferença de temperatura em regiões diferentes da fatia no início da desidratação osmótica, contudo esta diferença diminui ao longo do tempo, até que se atinja o equilíbrio térmico em cerca em 5 minutos de desidratação osmótica.

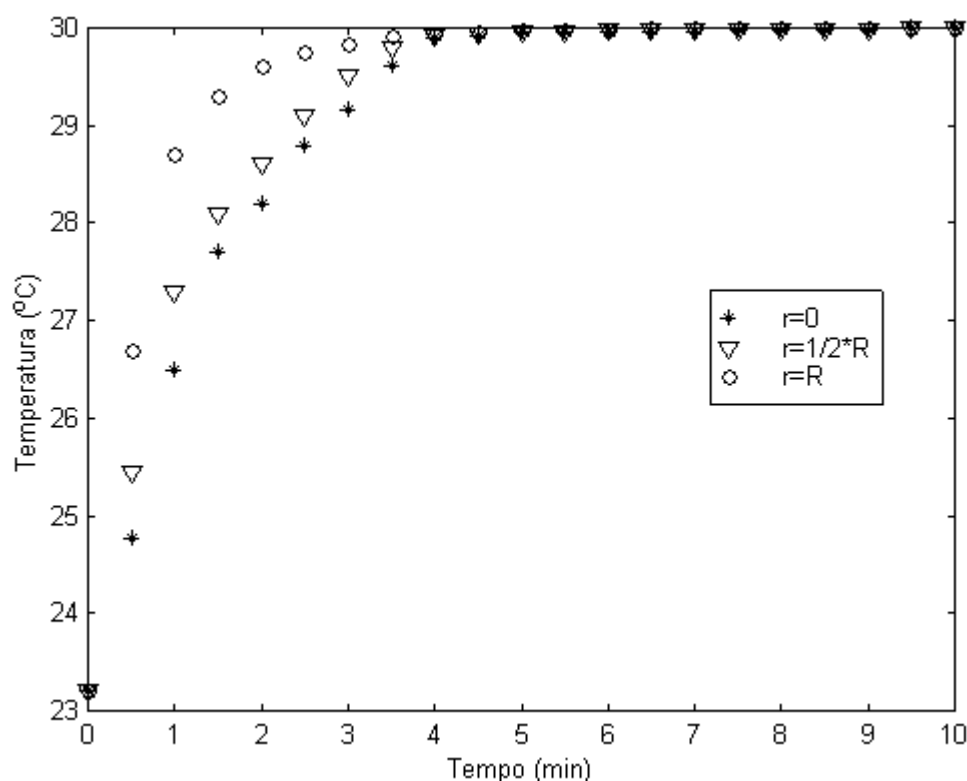


Figura 4.19 – Variação de temperatura do yacon no início da desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s, obtida numericamente.

Em uma perspectiva tridimensional, pode-se observar como a temperatura se distribui na fatia, tomando-se como exemplo o tempo de 1 minuto de processo para o tratamento osmótico a 50°C e 0 cm/s, condição experimental selecionada aleatoriamente a título de ilustração (Fig. 4.20). De acordo com os resultados da Fig. 4.19, a temperatura do yacon aumenta à medida em que se aproxima da borda da fatia.

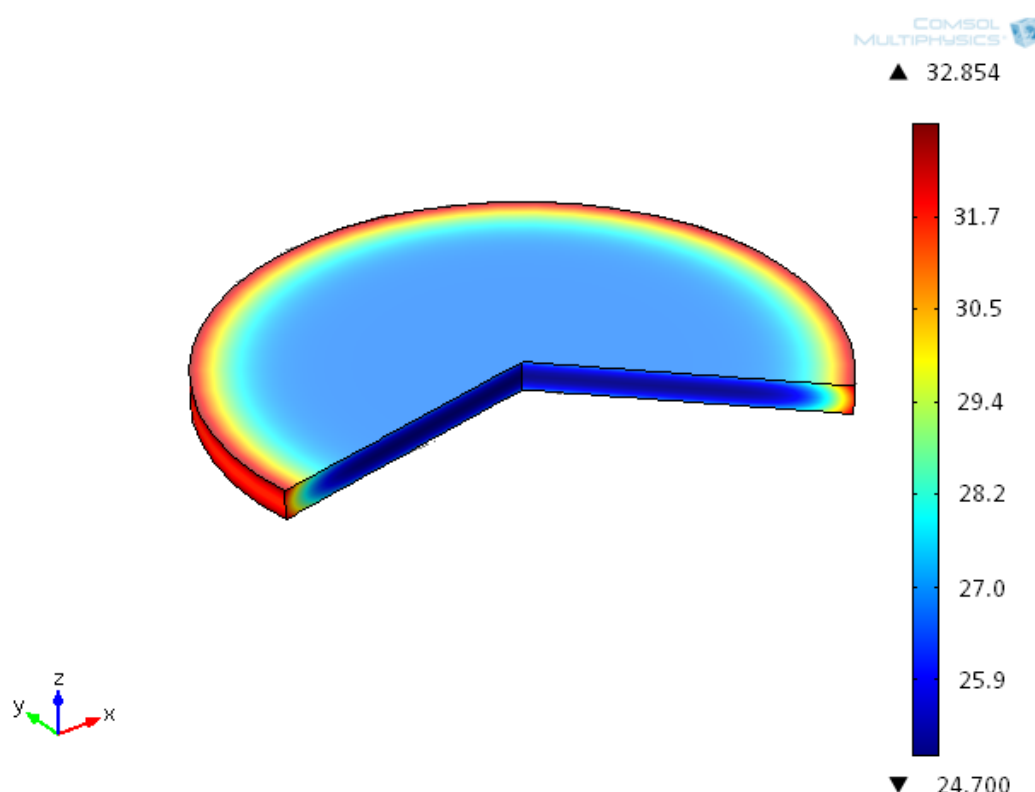


Figura 4.20 – Perfil de temperatura para uma fatia de yacon em 1 minuto de desidratação osmótica conduzida a 50°C e 0 cm/s.

A transferência de água (Fig. 4.21) e a absorção de sucralose (Fig. 4.22) são lentas durante a desidratação osmótica, o que ocorre em decorrência dos baixos gradientes de concentração entre o produto e a solução. Entretanto, é importante considerar que embora o gradiente de concentração seja pequeno – uma vez que as concentrações de água no produto e na solução são de aproximadamente 90% e 80%, em base úmida, respectivamente – os ganhos qualitativos do produto final atribuídos ao tratamento osmótico foram expressivos, conforme discutido nas seções anteriores. As fatias que receberam o tratamento osmótico adquiriram maior luminosidade e, após submetidas à secagem convectiva, apresentaram menores graus de encolhimento e distorção angular do que aquelas que foram secas diretamente em estufa. As previsões numéricas para a transferência de massa foram validadas pelos dados experimentais ($R^2 > 0,91$). Vale mencionar que se dispõe de poucos dados experimentais para a umidade e o conteúdo de sucralose das fatias de yacon durante o tratamento osmótico em virtude da dificuldade de se realizar tais determinações.

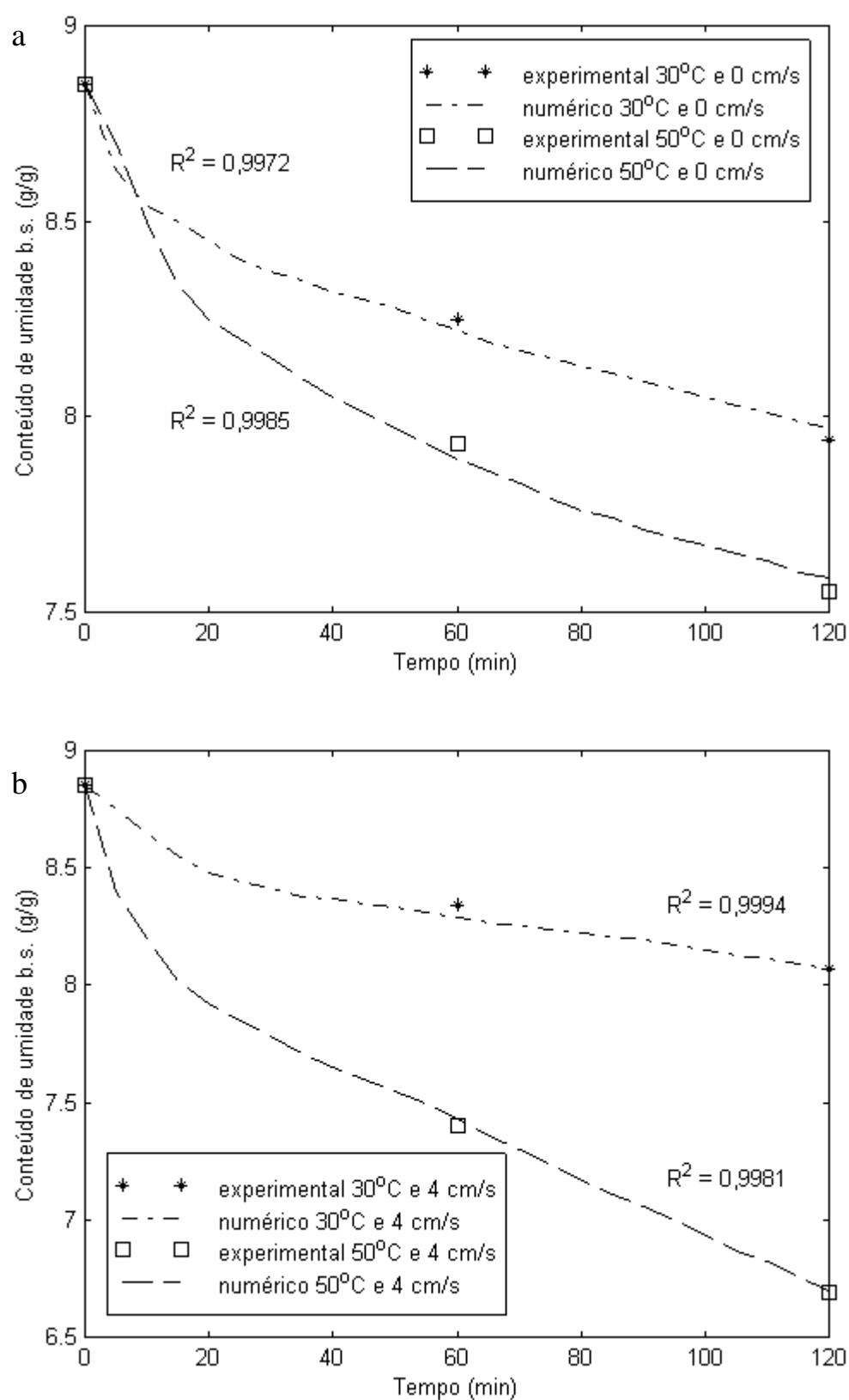


Figura 4.21 – Variação de umidade para o yacon durante a desidratação osmótica conduzida às temperaturas de 30°C e 50°C: (a) sem agitação; (b) com agitação.

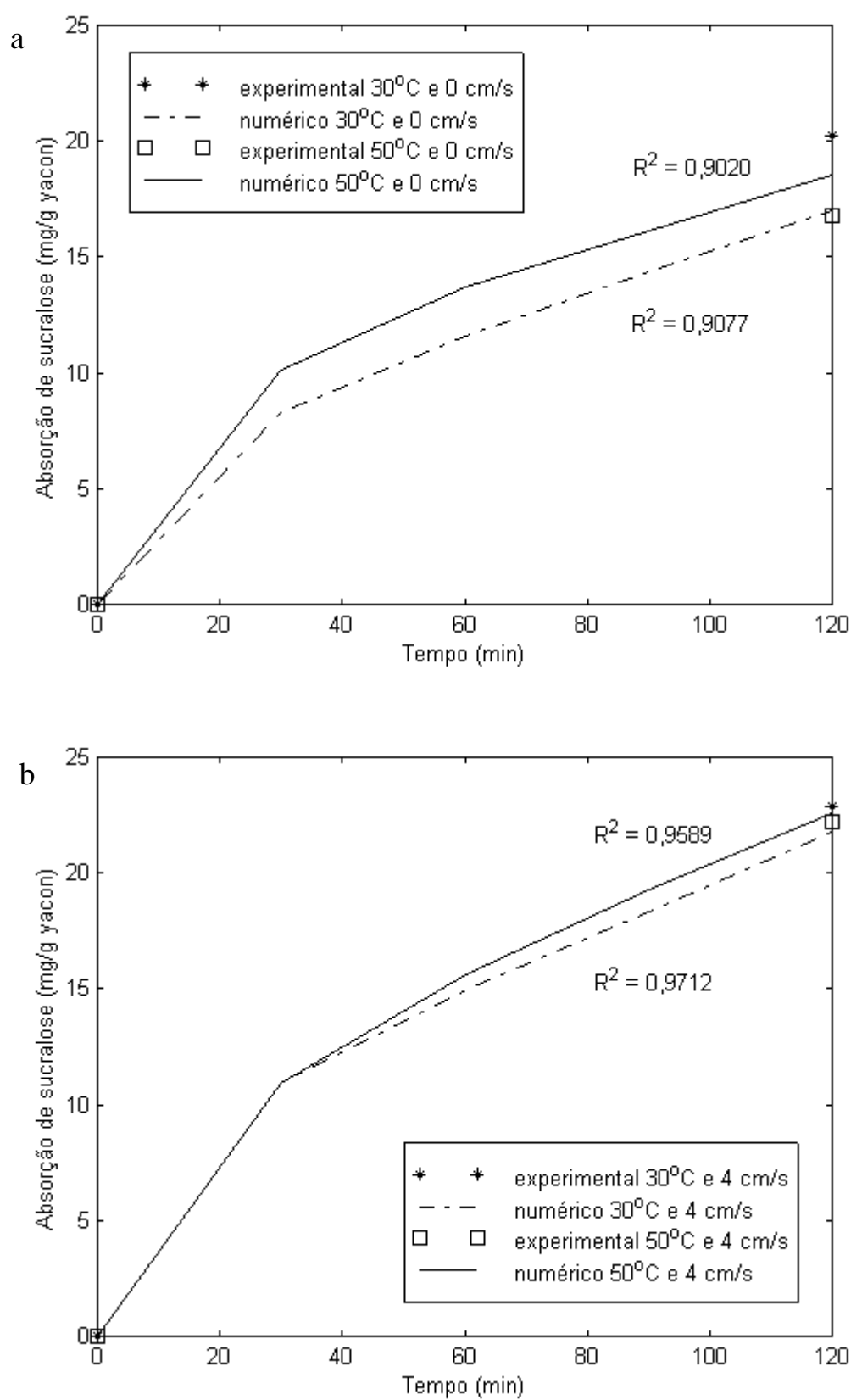


Figura 4.22 – Absorção de sucralose para o yacon durante o tratamento osmótico conduzido às temperaturas de 30°C e 50°C: (a) sem agitação; (b) com agitação.

Os resultados numéricos em formato de perfis tridimensionais apresentados na Fig. 23, indicam que em 2 horas de tratamento osmótico conduzido a 50°C e 0 cm/s, a amostra ainda não atingiu o equilíbrio quanto à transferência de massa, isto é, a fatia ainda não apresenta homogeneidade no conteúdo de umidade (Fig. 4.23a) e na concentração de sucralose (Fig. 4.23b). Na Figura 4.23a observa-se que ao fim da desidratação osmótica a parte exterior do produto possui o mesmo teor de umidade da solução osmótica (4 g água/g yacon, equivalente a 80% b.u.) devido ao contato direto entre eles. Enquanto o interior da fatia ainda possui cerca de 8 g água/g yacon (em torno de 90% b.u.), uma fina camada de produto, próxima à superfície, teve seu teor de umidade reduzido para aproximadamente 6,5 g água/g yacon (em torno de 87% b.u.), contudo a maior parte da fatia ainda se encontra com um teor de umidade praticamente igual ao do início do processo. De fato, conforme indicado pela análise de composição centesimal (Tab. 4.3), a redução do conteúdo de umidade durante a desidratação osmótica foi baixa. A Figura 4.23b indica que a absorção de sucralose ocorreu principalmente na superfície do produto, o que foi suficiente para conferir sabor mais doce ao yacon seco.

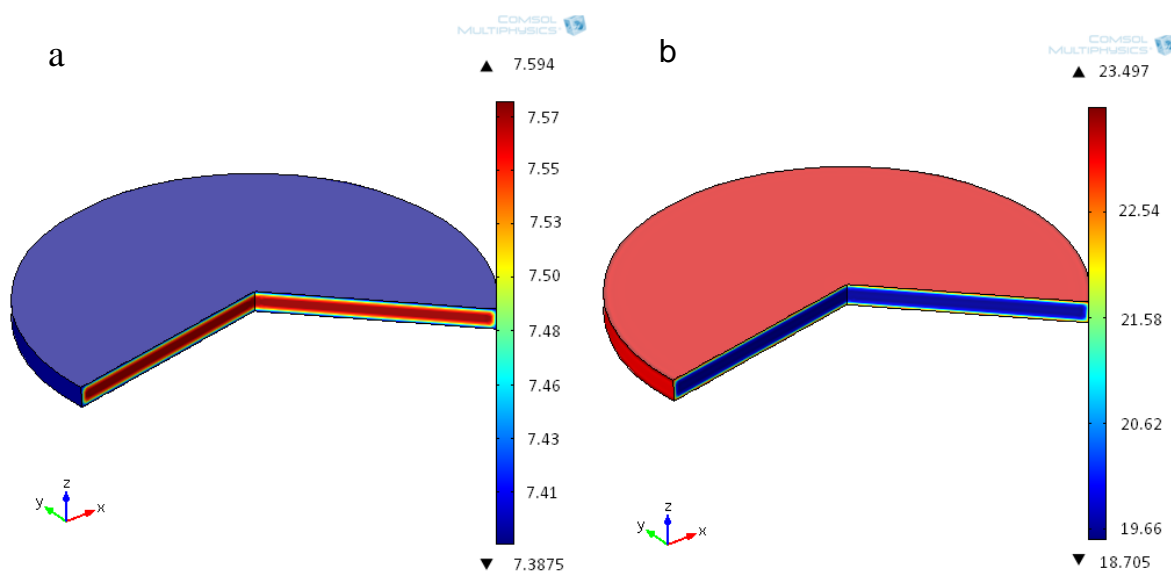


Figura 4.23 – Perfil de (a) conteúdo de umidade e (b) absorção de sucralose para uma fatia de yacon ao final da desidratação osmótica conduzida a 50°C e 0 cm/s.

A Figura 4.24 indica que a obtenção dos resultados numéricos independe da malha utilizada. A título de ilustração, utilizou-se os dados relativos à desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s, contudo vale ressaltar que a similaridade entre resultados para diferentes malhas ocorreu para todas as condições de processo. Desta forma, optou-se pelo uso da malha criada automaticamente pelo *software* para a ilustração de todos os resultados obtidos pelo modelo matemático.

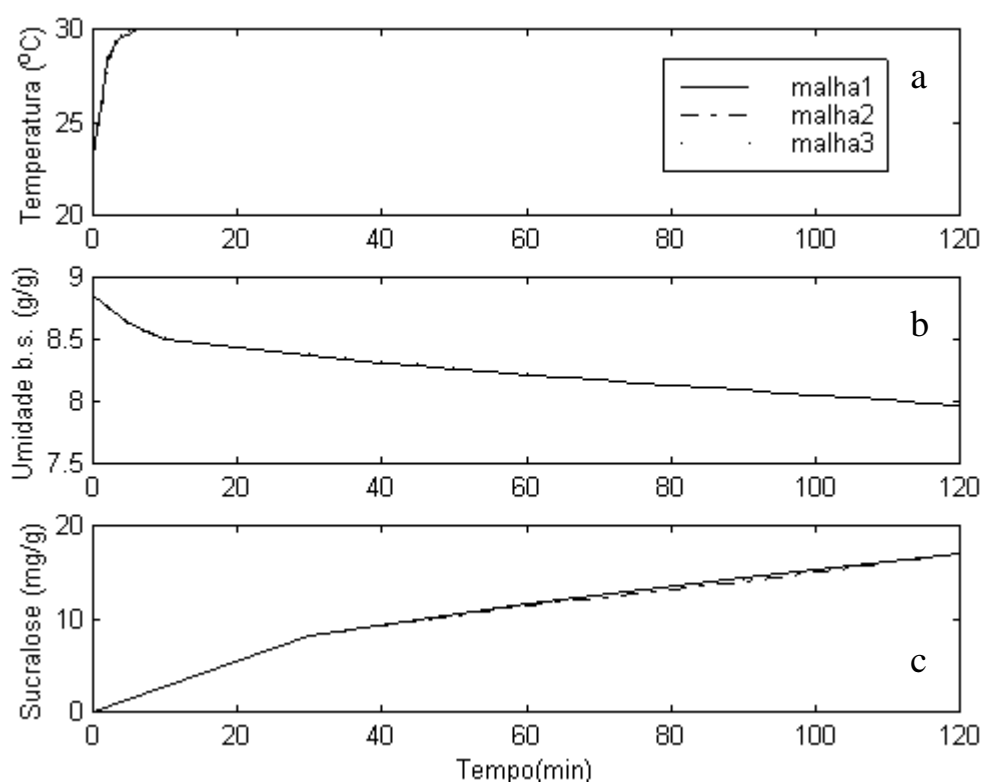


Figura 4.24 – Resultados numéricos para a variação de (a) temperatura, (b) umidade e (c) absorção de sucralose do yacon durante a desidratação osmótica conduzida a 30°C e 0 cm/s para malhas computacionais compostas por diferentes números de elementos triangulares: (1) 612, (2) 116 e (3) 40.

Na Fig. 4.25 encontram-se as simulações do processo de transferência de calor do yacon durante a etapa de secagem convectiva para dois testes cujas condições de processo (x_1 , x_2 e x_3) são todas diferentes, a fim de ilustrar os resultados menos próximos entre si. Embora os coeficientes de correlação sejam

altos ($R^2 > 0,97$), nota-se uma diferença significativa entre resultados experimentais e numéricos principalmente no início do processo, o que pode ser atribuído à insatisfatória eficiência do controle de temperatura da estufa. O controle de temperatura é realizado de maneira *on-off*, ou seja, assim que a temperatura do ar de secagem aumenta de maneira significativa, a resistência elétrica da estufa é desligada automaticamente para que a temperatura diminua. Quando se detecta que a temperatura está muito abaixo do *setpoint*, a resistência é novamente ligada. Desta maneira, ocorre variação da temperatura do ar de secagem, resultando em um perfil de aquecimento das fatias de produto diferente do que se obteria em uma condição ideal, como previsto numericamente.

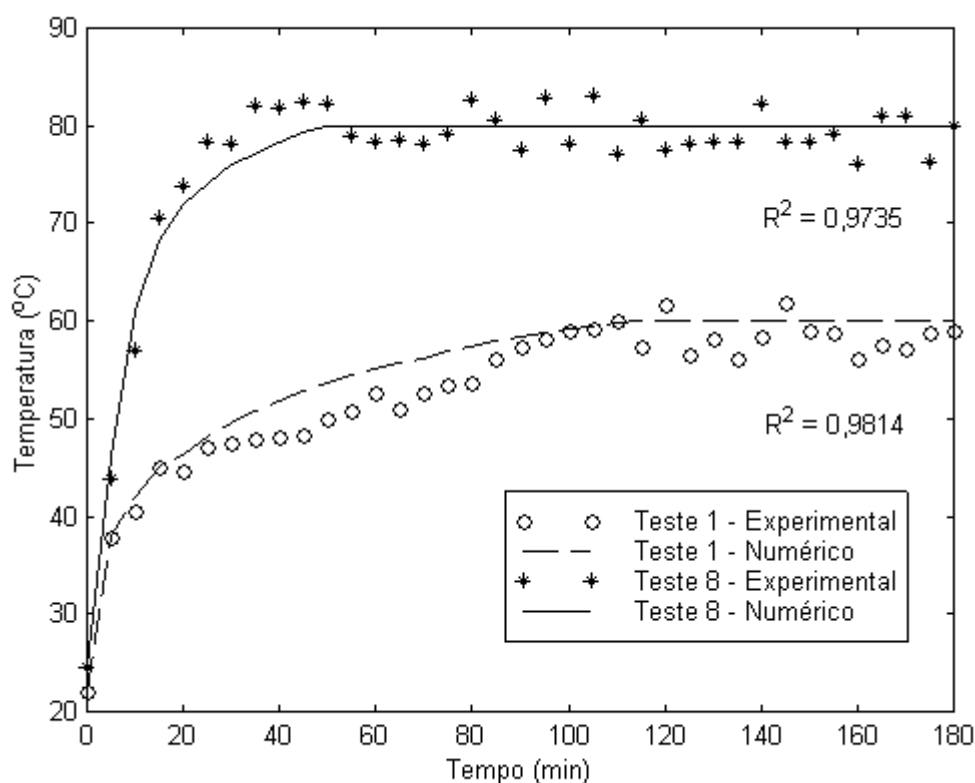


Figura 4.25 – Variação de temperatura para o yacon durante a secagem convectiva para o Teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C) e o Teste 6 (50°C, 4 cm/s e 80°C).

As simulações do processo de transferência de massa durante a secagem convectiva do yacon são apresentadas na Fig. 4.26 e indicam que a correlação

entre dados numéricos e experimentais é satisfatória ($R^2 > 0,99$). As duas curvas de secagem exibem comportamento bastante diferente, embora seu formato seja o mesmo. A taxa de secagem é maior para o teste 8 (50°C, 4 cm/s e 80°C) e a curva, que pode ser dividida em dois períodos principais, com velocidades diferentes, muda de tendência ao redor dos 30 minutos. O processo do teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C) possui dois períodos principais, contudo a diferença de taxa de secagem entre eles é sutil e acontece ao redor dos 80 minutos. A umidade final do yacon é menor para o teste 8, como esperado, em função das maiores temperaturas de processo e do uso de agitação durante a desidratação osmótica.

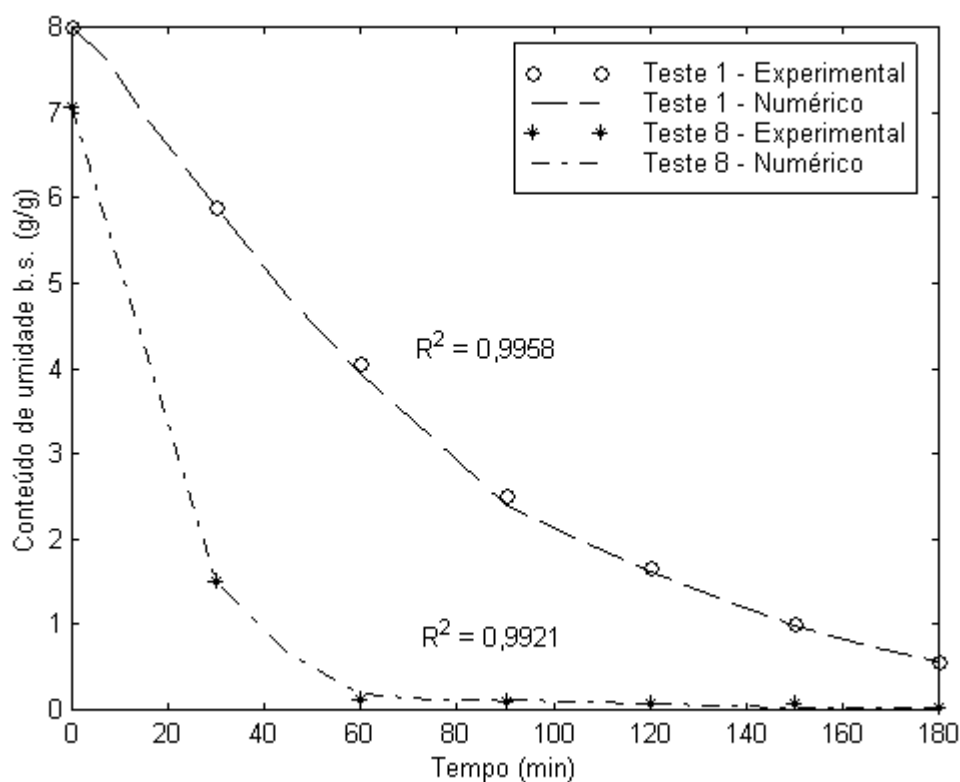


Figura 4.26 – Variação de umidade para o yacon durante a secagem convectiva para o Teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C) e o Teste 8 (50°C, 4 cm/s e 80°C).

Os perfis tridimensionais de temperatura e umidade do yacon na secagem convectiva são apresentados nas Figs. 4.27 e 4.28, para o Teste 1. Aos 10 minutos de processo, o produto ainda não atingiu o equilíbrio térmico, isto é, existe uma diferença significativa de temperatura entre o centro e as bordas da

fatia (Fig. 4.27). Ao final da secagem do Teste 1, embora o conteúdo de umidade do produto seja muito baixo, a simulação numérica indica que ainda não se atingiu a umidade de equilíbrio, uma vez que existe gradiente de umidade entre centro e bordas da fatia de yacon (Fig. 4.28).

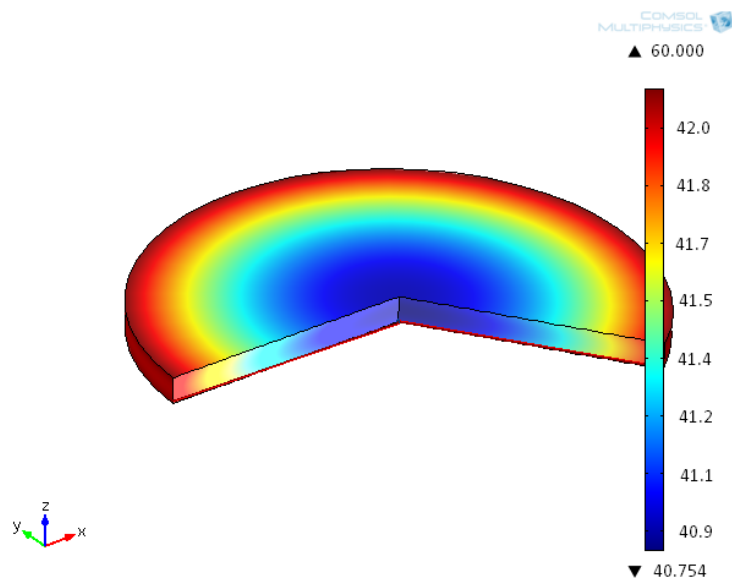


Figura 4.27 – Perfil de temperatura para uma fatia de yacon aos 10 minutos de secagem convectiva para o Teste 1 (30°C, 0 cm/s e 60°C).

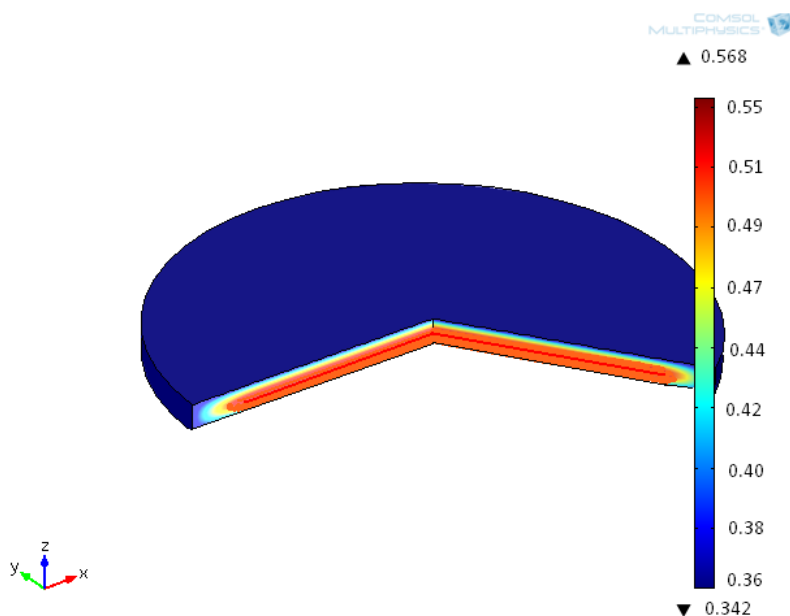


Figura 4.28 – Perfil de umidade para uma fatia de yacon ao final da secagem convectiva conduzida a 30°C, 0 cm/s e 60°C.

Assim como para a etapa de desidratação osmótica, a obtenção dos resultados numéricos para a secagem convectiva independe da malha utilizada. A Fig. 4.29 ilustra os resultados relacionados ao Teste 1 de secagem (30°C, 0 cm/s e 60°C) para três malhas diferentes.

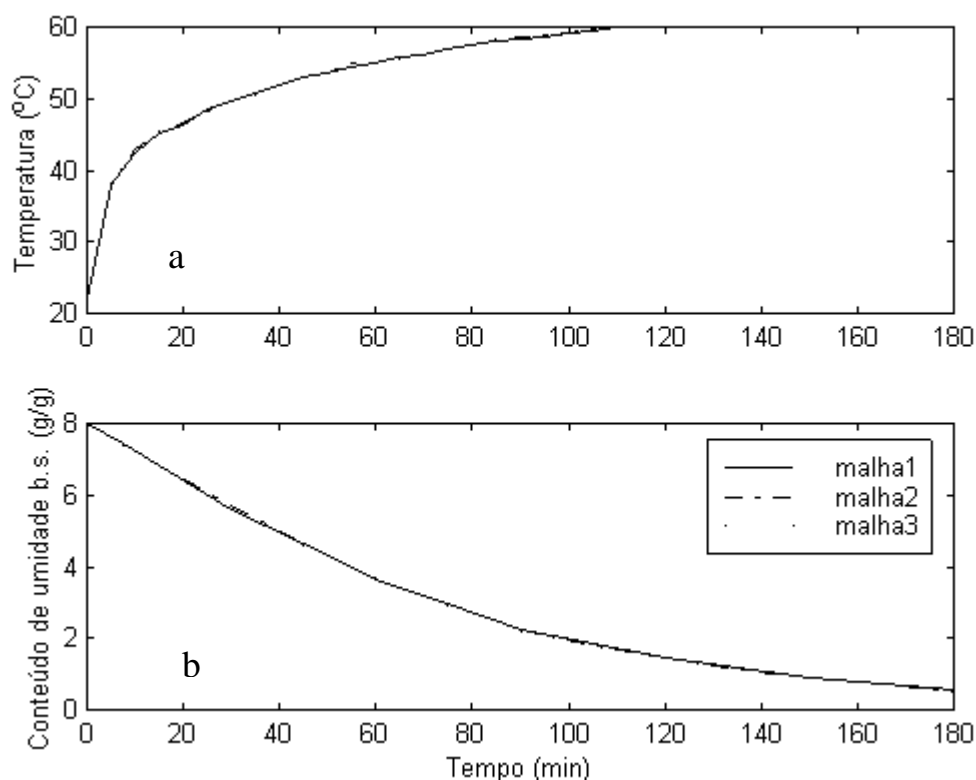


Figura 4.29 – Resultados numéricos para a variação de (a) temperatura e (b) umidade do yacon durante a secagem convectiva conduzida a 30°C, 0 cm/s e 60°C para malhas computacionais compostas por diferentes números de elementos triangulares: (1) 612, (2) 116 e (3) 40.

A validação da modelagem, realizada por meio da comparação de dados numéricos e experimentais, indica que é possível utilizar o modelo desenvolvido neste estudo para a simulação de processos realizados sob outras condições além das testadas em laboratório. A obtenção experimental das variações de temperatura, umidade e de absorção de agente osmótico é bastante trabalhosa e demorada, enquanto que a solução das equações diferenciais parciais governantes do processo por meio dos Método dos Elementos Finitos proporciona

maior rapidez na obtenção de resultados e redução de custos com experimentos em laboratório.

CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

O processo de secagem osmo-convectiva apresentou-se como uma tecnologia eficiente para aumentar a vida-de-prateleira das raízes de yacon, transformando-as em um produto com potencial de mercado. A aplicação do tratamento osmótico previamente à etapa de secagem convectiva resultou em ganho de qualidade: o produto obtido possui maior luminosidade e apresenta menores graus de encolhimento e distorção angular em comparação às fatias secas diretamente em estufa. A análise estatística revelou que o conteúdo de umidade (y_1) foi influenciado apenas pela temperatura de secagem. A mudança de cor (y_2), por sua vez, foi influenciada apenas pela temperatura da solução osmótica. Embora tenha ocorrido mudança de cor muito maior durante a etapa de secagem convectiva do que no tratamento osmótico, em decorrência das maiores temperaturas de processo, houve diferença estatisticamente significativa entre amostras tratadas a condições diferentes apenas na desidratação osmótica. Após a secagem convectiva, todas as amostras apresentaram resultados similares para este parâmetro. A concentração de sólidos solúveis (y_3) não foi influenciada por nenhuma das condições de processo na faixa de valores utilizada neste estudo.

Quanto à composição centesimal do yacon, o tratamento osmótico reduziu o conteúdo de umidade e aumentou o teor de carboidratos totais de forma similar em todas as combinações de processo. Enquanto o teor de lipídeos não sofreu alteração significativa entre amostras tratadas e *in natura*, o conteúdo de proteínas e de minerais foi reduzido em decorrência do tratamento osmótico, dependendo das condições utilizadas. Apenas os processos a 30°C e 0 cm/s e 50°C e 4 cm/s não causaram decréscimo significativo nos teores de proteínas e minerais do yacon. Durante a secagem convectiva, de forma lógica, apenas os teores de cada nutriente foram alterados em relação ao produto pré-tratado.

O conteúdo de FOS e de açúcares livres do yacon não pôde ser avaliado nas condições cromatográficas utilizadas. A absorção de sucralose, contudo, foi determinada e assumiu o valor de aproximadamente 20 mg de edulcorante por g de yacon ao final da desidratação osmótica.

Obtiveram-se modelos matemáticos para a predição de algumas propriedades termofísicas do yacon, tais como massa específica, calor específico e condutividade térmica, os quais se baseiam apenas no conteúdo de umidade do produto. Tais correlações podem ser utilizadas para raízes de yacon de diferentes origens e cultivares, visto que a diferença de composição centesimal entre o yacon utilizado neste trabalho e os outros tipos desta raiz reportados na literatura é muito pequena.

A modelagem matemática mostrou-se eficiente na predição das variações de temperatura, umidade e da absorção de sucralose durante a secagem osmoconvectiva do yacon. Desta forma, ela representa uma ferramenta importante no planejamento e otimização deste processo, possibilitando significativa economia de tempo para obtenção de resultados e redução de custos laboratoriais. Vale mencionar que o modelo desenvolvido baseou-se numa abordagem teórica, portanto pode ser utilizado para a simulação de processos de desidratação osmótica e secagem convectiva de outros produtos alimentícios, sendo necessários, logicamente, as propriedades termofísicas do alimento em estudo e os parâmetros de transferência de calor e massa do sistema em questão.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Dado o crescente consumo do yacon em decorrência principalmente de seu poder prebiótico, é relevante otimizar o método de análise de açúcares por HPLC. A investigação da influência das condições de processo no teor de açúcares é importante na otimização do processamento térmico do yacon, de maneira que se possa evitar ou reduzir a despolimerização dos FOS, que leva ao indesejável aumento da concentração dos açúcares livres (glicose, frutose e sacarose).

Tendo em vista que o custo da sucralose como agente osmótico é muito maior do que o custo do yacon, é também interessante se estudar meios de reutilizar a solução desidratante, utilizando-se técnicas de filtração, por exemplo. A possibilidade de reciclo da solução ou de seu uso na formulação de outros produtos pode tornar o processo de desidratação osmótica mais viável econômica e ambientalmente (PEIRÓ- MENA et al., 2007).

Sugere-se ainda como continuidade deste trabalho o estudo em larga escala das melhores condições de processo determinadas. Neste contexto, o foco principal deve estar no uso de um secador convectivo dotado de controle de umidade relativa do ar.

REFERÊNCIAS

- ALAKALI, J. S.; ARIAHU, C. C; NKPA, N. N. Kinetics of osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 30, n. 5, p. 597-607, 2006.
- ALFARO, M. E.; MELGAREJO, S. A. V. El yacón: una nueva alternativa en la prevención y el tratamiento de la salud. Disponível em <http://infoagro.net/es/apps/news/record_view.cfm?vsys=a5eid=8641>. Acesso em 2 nov. 2009.
- ALMEIDA, P. I. F.; BACELOS, M. S. Análise experimental e modelagem do fenômeno de encolhimento durante a secagem. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2002, Natal. p. 1-7.
- ANDRADE, S. A.; METRI, J. C.; BARROS NETO, B. Desidratação osmótica do jenipapo (*Genipa americana L.*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 23, n. 2, p. 276-281, 2003.
- ANTONIO, G. C., AZOUBEL, P. M., MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Osmotic dehydration of sweet potato (*Ipomoea batatas*) in ternary solutions. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 28, n. 3, p. 696-701, 2008.
- ARAÚJO, J. M. A. *Química de alimentos: teoria e prática*. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2004.
- ASHRAE. *Refrigeration Handbook: thermal properties of foods*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2002.
- AYBAR; M. J; SÁNCHEZ RIERA, A. N.; GRAU, A.; SÁNCHEZ, S. S. Hypoglycemic effect of the water extract of *Smallantus sonchifolius* (yacon) leaves in normal and diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 74, n. 2, p. 125-132, 2001.

AZUARA, E.; CORTÉS, R.; GARCIA, H. S.; BERISTAIN, C. L. Kinectic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 27, p. 409-418, 1992.

BARBOSA-CANOVAS, G. V; VEGA-MERCADO, H. *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia, 2000. 279 p.

BERNARDI, S.; BODINI, R. B.; MARCATTI, B.; PETRUS, R. R.; FAVARO-TRINDADE, C. S. Quality and sensorial characteristics of osmotically dehydrated mango with syrups of inverted sugar and sucrose. *Scientia Agricola*, v. 66, n. 1, p. 40-43, 2009.

BOERI, C. N.; KHATCHATOURIAN O. Um modelo matemático para simulação de secagem de grãos de soja. In: ANAIS DO XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 2005. p.1-2.

BORNET, F. R. Undigestible sugars in food products. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 59, n. 3, p.763S-769S, 1994.

BORSATO, D.; MOREIRA, I.; NÓBREGA, M. M.; MOREIRA, M. B. Modelagem e simulação da desidratação osmótica em pedaços de abacaxi utilizando o método de elementos finitos. *Química Nova*, v. 32, n. 8, p. 2109-2113, 2009.

CABELLO, C. Extração e pré-tratamento químico de frutanos de yacon, *Polymnia sonchifolia*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 25, n. 2, p. 202-207, 2005.

CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S., FERNANDES, T. N., GONÇALVES JÚNIOR, S. Desidratação osmótica de batata baroa (*Arracacia xanthorrhiza*). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 34, n. 1, p. 15-20, 2004.

CAMPOS, D.; PALLARDEL-BETALLELUZ, I.; CHIRINOS, R.; AGUILAR-GALVEZ, A.; NORATTO, G.; PEDRESCHI, R. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus*

sonchifolius Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry*, v. 13, p. 1592-1599, 2012.

CARMO, J.E.F.; LIMA, A. G. B. Drying of Lentil Including Shrinkage: A Numerical Simulation. *Drying Technology*, v. 23, p. 1977-1992, 2005.

CAZETTA, M. L.; MARTINS, P. M. M.; MONTI, R.; CONTIERO, J. Yacon (*Polymnia sanchifolia*) extract as a substrate to produce inulinase by *Kluyveromyces marxianus* var. *bulgaricus*. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p. 301-305, 2005.

CHURCHILL, S. W.; BERNSTEIN, M. A correlation equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in cross flow. *Journal of Heat Transfer*, v. 94, p. 300–306, 1977.

CORRÊA, J. L. G.; SILVA FILHO, E. D.; BATISTA, M. B.; AROLA, F.; FIOREZE, R. Desidratação osmótica de tomate seguida de secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 10, n. 1, p. 35-42, 2008.

CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1975.

EL-AOUAR, Â. A.; MURR, F. E. X. Estudo de modelagem da cinética de desidratação osmótica do mamão formosa (*Caricapapaya* L.). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.23, n.1, p. 69-75, 2003.

EL-AOUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M.; BARBOSA JÚNIOR, J. L.; MURR, F. E. X. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, v. 75, p. 267-274, 2006.

EREN, I.; KAYMAK-ERTEKIN, F. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 344-352, 2007.

ERTEKIN, F. K.; CAKALOZ, T. Osmotic dehydration of peas: influence of process variables on mass transfer. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 20, p. 87-104, 1996.

ESAKI, C. Y.; QUADRI M. B.; QUADRI, M. G. N. Efeito da umidade relativa sobre o coeficiente de difusão efetiva durante a secagem de erva cidreira (*Cymbopogon citratus*). In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2002, Natal, v.1. p. 497-503.

FITO, P.; CHIRALT, A.; BETORET, N.; GRAS, M.; CHÁFER, M.; MARTINÉSMONZÓ, J; ANDRÉS, A.; VIDAL, D. Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering: application in functional fresh food development. *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 175-183, 2001.

FLOURY, J.; LE BAIL, A.; PHAM, Q. T. A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *Journal of Food Engineering*, v. 85, p. 1-11, 2008.

FREITAS, D.G.C.; JACKIX, M.N.H. Efeito de bebida adicionada de frutoligossacarídeo e pectina no nível de colesterol e estimulação de bifidobactérias em hamsters hipercolesterolêmicos. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 8, n. 1, p. 81-86, 2005.

GARCIA, P. *Producción de jarabe de fructosa del yacón (Smallanthus sonchifolia Poepp. e Endl.) por fermentação com uma cepa nativa (Bacillus sp.)*. 2000. 81 f. Tese (Doutorado em Farmácia e Bioquímica) - Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

GIBSON, G. R.; ROBERFROID, M. B. Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*, v. 125, p. 1401-1412, 1995.

GONÇALVES, A. A.; BLUME, A. R. Efeito da desidratação osmótica como tratamento preliminar na secagem do abacaxi. *Estudos Tecnológicos*, v. 4, n. 2, p. 124-134, 2008.

GRAEFE, S.; HERMANN, M.; MANRIQUE, I.; GOLOMBEK, S.; BUERKERT, A. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, v. 86, p. 157-165, 2004.

GRAU, A.; REA, J. Yacon. *Smallanthus sonchifolius* (Poep. e Endl.) H. Robinson. In: HERMANN, M.; HELLER, J. *Andean roots and tubers: ahipa, arracacha, maca and yacon*. Rome: International Plant Genetic Resources Institute, 1997.

HARTEMINK, R.; VANLAERE, K. M. J.; ROMBOUTS, F. M. Growth of enterobacteria on fructo-oligosaccharides. *Journal of Applied Microbiology*, v. 383, p. 367-374, 1997.

HAWKES, J.; FLINK, J. M. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 2, n. 4, p. 265-284, 1978.

HELDMAN, D. R. *Prediction models for thermophysical properties of foods*. New York: Marcel Dekker, 2001.

HERMANN, M.; FREIRE, I. *Compositional diversity of the yacon storage root*. Lima: Centro Internacional de la Papa, 1998.

HOLMAN, J. P. *Experimental methods for engineers*, 5 ed. New York: McGraw-Hill Books, 1989.

IBITWAR, B. B.; KAUR, B.; ARORA, S.; PATHARE, P. B. Osmo-convective dehydration of plum (*Prunus salicina* L). *International Journal of Food Engineering*, v. 4, n. 8, 2008.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1990.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. *Normas analíticas: métodos químicos e físicos para análises de alimentos*. v. 1. 3. ed. São Paulo, 1985.

ISPIR, A.; TOGRUL, I. C. Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 87, p. 166-180, 2009.

JENNER, M. R., SMITHSON, A. Physicochemical properties of the sweetener sucralose. *Journal of Food Science*, v. 54, n. 6, p. 1646-1649, 1989.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, p. 4914-4925, 2005.

KNUDSEN, J. D.; KATZ, D. L. *Fluid dynamics and heat transfer*. New York: McGraw-Hill, 1958.

KOTOVICZ, V. *Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon* (*Polymnia sonchifolia*). 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LACHMAN, J.; HAVRLAND, B.; FERNÁNDEZ, J.; DUDJAK, J. Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. *Plant Soil Environment*, v. 50, n. 9, p. 383-390, 2004.

LAWLESS H. T., HEYMANN, H. *Sensory evaluation of food: principles and practices*. 2. ed. New York: Springer, 2010.

LAZARIDES, H, N, KATSANIDIS, E, NICKOLAIDIS, A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, v. 25, p. 151-166, 1995.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technology*, v. 14, n. 2, p. 391-413, 1996.

LERICI, C.R.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M.; BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *Journal of Food Science*, v. 50, p. 1217-1226, 1985.

LIMA, A. S.; DE FIGUEIREDO, R. W.; MAIA, G. A.; DE SOUSA, J. R. L.; MACHADO, P. H. Estudo da estabilidade de melões desidratados obtidos por desidratação osmótica seguida de secagem convencional. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 26, n. 1, p. 107-109, 2004.

LIMA, J. M. *Influência da temperatura de armazenamento e atmosfera modificada sobre o pH, acidez total titulável, sólidos solúveis e parâmetros microbiológicos dos tubérculos de yacon (Polymnia sonchifolia) minimamente processados*. 2003. 135f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LIENHARD, J. H. IV; LIENHARD, J. H. V. *A heat transfer textbook*. 4. ed. Cambridge: Phlogiston, 2010.

LOMBARD, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; FITO, P.; ANDRÉS, A. Osmotic dehydration of pineapple as a pretreatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, v. 85, p. 277-284, 2008.

MACCARTHY, D. *Concentration and drying of foods*. London: Elsevier, 1989. 303p.

MALDONADO, S; SANTAPAOLA, J. E.; SINGH, J.; TORREZ, M; GARAY, A. Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 28, n. 1, 2008.

MANRIQUE, I.; PÁRRAGA, A. *Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993-2003)*. Centro Internacional de La Papa, 2005.

MARANGONI, A. L.; COLLARES, F. P. Avaliação dos processos de atomização e liofilização para a produção de extrato em pó de Yacon (*Polymnia Sonchifolia*). In: DRYING 2004 – PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 2004, São Paulo, vol. C, p. 1707-1711.

MARQUES, L. F.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. C.; COSTA, T. L.; COSTA, P. B. S. Secagem precedida de desidratação osmótica de pseudofruto de caju: comparação entre modelos matemáticos aplicados. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 9, n. 2, p. 161-170, 2007.

MARTINS, S. I .F. S., JONGERN, W. M. F., BOEKEL, M. A. J. S. van. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modeling. *Trends in Food Science and Technology*, v. 11, n. 9-10, p. 364-373, 2000.

MASSON, M. L.; LIMA, J. M. Yacon: um alimento funcional promissor. *Nutrição Brasil*, v. 2, n. 3, p. 166-168, 2003.

MASSON, M. L., MOURA, C. P.; YAMAMOTO, C. Osmo-convective effect on the color of yacon (*Polymnia sonchifolia*). In: PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 2004, São Paulo, Brazil.

MASSON, M. L.; MICHELS, I.; VAZ, S. K.; AMSON, G. V. Determinação da atividade da polifenoloxidase em tubérculos de yacon minimamente processados. In: I ENCONTRO PARANAENSE DE ENGENHARIA E CIÊNCIA - EPEC, 2004, Toledo.

MASSON, M. L.; GRANATO, D.; PEKARSKI, F. V. B. W.; BENINCÁ, C. Doce dietético misto de Yacon e maracujá: avaliação da aceitabilidade e da estabilidade físico-química sob refrigeração. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 12, p. 200-204, 2009.

MATISSEK, R; SCHNEPEL, F. M.; STEINER, G. *Análisis de los alimentos: fundamentos, métodos, aplicaciones*. Zaragoza: Acribia, 1998.

MICHELS, I. *Aspectos tecnológicos do processamento mínimo de tubérculos de yacon (Polymnia sonchifolia) armazenados em embalagens com atmosfera modificada*. 2005. 108f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MIGLIORI, M.; GABRIELE, D.; CINDIO B.; POLLINI C.M. Modelling of high quality pasta drying: quality indices and industrial applications. *Journal of Food Engineering*, v. 17, p. 242-251, 2004.

MOHESNIN, N. M. *Thermal properties of food and agricultural materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980.

MOSCATTO, J. A.; PRUDÊNCIO-FERREIRA, S. H.; HAULY, M. C. A. Farinha de yacon e inulina como ingredientes na formulação de bolo de chocolate. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 24, n. 4, p. 634-640, 2004.

MOSCATTO, J. A.; BORSATO, D.; BONA, E.; DE OLIVEIRA, A. S.; HAULY, M. C. O. The optimization of the formulation for a chocolate cake containing inulin and yacon meal. *International Journal of Food and Technology*, v. 41, p. 181-188, 2006.

MOURA, C. P. *Aplicação de redes neurais para a predição e otimização do processo de secagem de yacon (Polymnia sonchifolia) com pré-tratamento osmótico*. 2004. 115f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) –

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MOURA, N. A. de; CAETANO, B. F. R.; SIVIERI, K.; URBANO, L. H.; CABELLO, C.; RODRIGUES, M. A. M.; BARBISAN, L. F. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. *Food and Chemical Toxicology*, v. 50, p. 2902-2910, 2012.

NACHTIGALL, A. M.; ZAMBIAZI, R. C. Geléias de hibisco com reduzido valor calórico: características sensoriais. *Boletim CEPPA*, v. 24, n. 1, p. 47-58, 2006.

NICOLETTI, J. F. *Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi*. 2001. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual Júlio de Mesquita, São José do Rio Preto.

NUSSELT, W. Das grundgesetz des wärmeübergangs. *Gesundheits-Ingenieur*, v. 38, p. 477-482, 1915.

OLIVEIRA de, A. M.; NISHIMOTO, E. K. Avaliação do desenvolvimento de plantas de yacon (*Polymnia sonchifolia*) e caracterização dos carboidratos de reserva em HPLC. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 7, n. 2, p. 215-220, 2004.

OJANSIVU, I.; FERREIRA, C. L.; SALMINEN, S. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. *Trends in Food Science and Technology*, v. 22, n. 1, p. 40-46, 2011.

OZDEMIR, M., OZEN, B. F., DOCK, L. L., FLOROS, J. D. Optimization of the osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*, v. 41, p. 2044-2050, 2008.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; REIS, F. P. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PAVKOV, I.; BABIĆ, L.; BABIĆ, M.; RADOJČIN, M. Osmotic drying of apricot (*Prunus armeniaca*) in sucrose solution. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, v. 74, n. 3, p. 253-257, 2009.

PEISINO, A. L.; ALBERTO, D. L.; BAHIA, G. S. S.; MENDES, M. F.; E CALÇADA, L. A. Determinação de parâmetros na secagem do *cymbopogon citratus* (capim-limão): parte I. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2005, Campinas.

PEKOSŁAWSKA, A.; LENART, A. Osmotic dehydration of pumpkin in starch syrup. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, v. 17, n. 2, p. 107-113, 2007.

PERUSSELLO, C. A. *Estudo dos parâmetros de processo e modelagem numérica da secagem do resíduo sólido da produção do extrato hidrossolúvel de soja (Okara)*. 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

PERUSSELLO, C. A.; AMARANTE, A. C. C.; MARIANI, V. C. Convective Drying Kinetics and Darkening of Okara. *Drying Technology*, v. 27, p. 1132-1141, 2009.

POLLEY, S. L.; SNYDER, O. P.; KOTNOUR, P. A compilation of thermal properties of foods. *Journal of Food Technology*, v. 34, n. 11, p. 76-94, 1980.

PONTING, J. D. Osmotic dehydration of fruits—recent modifications and applications. *Process Biochemistry*, v. 8, p. 18-20, 1973.

PRYOR, R. W. *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, 2011.

QUEIROZ, V. A. V.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B.; GRAVINA, G. A.; QUEIROZ, L. R.; DELIZA, R. Desidratação por imersão-impregnação e secagem

por convecção de goiaba. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 10, p. 1479-1486, 2007.

QUIRION, S. B.; VILLENEUVE, S.; LE BLANC, D. I.; DELAQUIS, P. Thermophysical properties and thermal behavior of leafy vegetables packaged in clamshells. *Journal of Food Engineering*, v. 113, p. 27-32, 2012.

RAOULT-WACK, A. L., RIOS, G., SUREL, R., GIROUX, F., GUILBERT, S. Modelling of dewatering and impregnation soaking process (osmotic dehydration). *Food Research International*, v. 27, p. 207-209, 1994.

RASTOGI, N. K., RAGHAVARAO, K. S. M. S., NIRANJAN, K. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. *Journal of Food Engineering*, v. 31, p. 423-432, 1997.

RASTOGI, N. K., ESHTIAGHI, M. N., KNORR, D. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. *Journal of Food Science*, v. 64, p. 1020–1023, 1999.

RASTOGI N. K.; RAGHAVARAO K. S. M. S.; NIRANJAN K.; KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Food Science and Technology*, v. 13, p. 48-59, 2002.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; NIRANJAN, K.; KNORR, D. Opportunities and challenges in high pressure processing of foods. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, v. 47, n. 1, p. 69-112, 2007.

REIS, F. R.; LENZI, M. K.; de MUÑOZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; MASSON, M. L. Vacuum Drying Kinetics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the Effect of Process Conditions on Fractal Dimension and Rehydration Capacity. *Drying Technology*, v. 30, p. 13-19, 2012.

REIS, F. R.; LENZI, M. K.; MASSON, M. L. Effect of vacuum drying conditions on the quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices: process optimization toward color quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 36, p. 67-73, 2012.

RIBEIRO, J. A. R. *Estudo químico e bioquímico do yacon (Smallanthus sonchifolius) in natura e processado e influência do consumo de yacon sobre níveis glicêmicos*. 2008. 96 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. Uma estratégia sequencial de planejamentos. Itaquaquecetuba: Editora Casa do Pão, 2005.

ROMERO-PEÑA. L. M.; KIECKBUSCH, T. G. L. Influência de Condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 6, n. 1, p. 69-76, 2003.

SANJINÉZ-ARGADOÑA, E. J. *Desidratação osmótica de goiaba por imersão e secagem*. 1999. 102 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raíz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. *Ciência Rural*, v. 38, p. 898-905, 2008.

SAPATA, M. L.; FERREIRA, A.; ANDRADA, L.; LEITÃO, A. E.; CANDEIAS, M. Osmotic dehydration of mandarins: influence of reutilized osmotic agent on behaviour and product quality. *Food Science and Human Nutrition*, v. 3, p. 23-35, 2009.

SCHER, C. F.; RIOS, A. O.; NOREÑA, C. B. Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 44, n. 11, p. 2169-2175, 2009.

SEMINARIO, J.; VALDERRAMA, M.; MANRIQUE, I. *El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio*. Lima: Centro Internacional de la Papa, 2003.

SHI, J.; LE MAGUER, M. Osmotic Dehydration of Foods: Mass Transfer and Modeling Aspects. *Food Reviews International*, v. 18, n. 4, p. 305-335, 2009.

SHILTON, N. Drying Theory. Universidade de Dublin. Disponível em <<http://www.ucd.ie/food/html/homepage/nshilton.htm>>. Acesso em 23 set. 2006.

SHUKLA, B. D.; SINGH, S. P. Osmo-convective drying of cauliflower, mushroom and greenpea. *Journal of Food Engineering*, v. 80, n. 2, p. 741-747, 2007.

SILVA, A. S. S. *A raíz da yacon (Smallanthus sonchifolius Poepping e Endlicher) como fonte de fibras alimentares, sua caracterização físico-química, uso na panificação e sua influência na glicemia pós-prandial*, 2007. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, F. D.; MATA, M. E. E. M. C., DUARTE, M. E. M.; COSTA E SILVA, Y. Desidratação osmótica de banana da terra (*Musa sapientum*): aplicação de modelos matemáticos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 25, n. 2, p. 285-290, 2005.

SINGH, B.; KUMAR, A.; GUPTA, A. K. Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 471-480, 2007.

HELDMAN, D. R.; SINGH, P. R. *Food process engineering*. 2. ed. New York: Editora V. N. Reinhold, 1981.

SINGH, P. R.; HELDMAN, D. R. *Introduction to food engineering*. 2. ed. New York: Academic Press, 1993.

SIMONOVSKA, B.; VOVK, I.; ANDRENESEK, S.; VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. Investigation of phenolic acids in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves and tubers. *Journal of Chromatography A*, v. 1016, p. 89-98, 2003.

SOUZA, C. M. A., QUEIROZ, D. M., LACERDA FILHO, A. F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. *Scientia Agricola*, v. 59, n. 4, p. 653-660, 2002.

SOUZA NETO, M. A.; MAIA, G. A.; LIMA, J. R.; FIGUEIREDO, R. W.; SOUZA FILHO, M. S. M., LIMA, A. S. Osmotic dehydration of mango followed by conventional drying: evaluation of process variables. *Ciência Agrotécnica*, v. 29, n. 5, p. 1021-1028, 2005.

SPIEGEL, J. E.; ROSE R.; KARABELL P.; FRANKPS V. H.; SCHIMITT, D. F. Safety and benefits of frutooligosaccharides as food ingredients. *Food Technology*, v. 48, p. 85-89, 1994.

STRICKLING, J. A. Evaluation of oligosaccharides addition to dog diets: influences on nutrient digestion and microbial populations. *Animal Feed Science and Technology*, v. 86, p. 205-219, 2000.

TAKENAKA, M. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, n. 3, p. 793-796, 2003.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, v. 26, p. 59-68, 1993.

TORREGGIANI, D.; BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 247-253, 2001.

VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. *Handbook of Food Engineering Practice*. New York: CRC Press, 1997.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. *Biomedical Papers*, v.147, n. 2, p. 119-130, 2003.

VASQUES, A. R.; VALLE, R. C. S. C. ; BERTOLI, S. L.; TAVARES, L. B. B.; BEGNINI, I. M.; KRETZSCHMAR, M. Dehydration of yacon as an alternative for the food production process. In: ENPROMER - IV CONGRESSO MERCOSUL DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E PROCESSOS, 2005, Rio de Janeiro.

VITOLO, M. R. *Nutrição: da gestação à adolescência*. Rio de Janeiro: Reichman & Affonso Editores, 2003.

YAMASHITA, K.; KAWAI, K.; ITAKAMURA, M. Effects of fructooligosaccharids on blood-glucose and serum lipids in diabetic subjects. *Nutrition Research*, v. 4, p. 961-966, 1984.

YUN, J. W. Fructooligosaccharides - Occurrence, preparation and applications. *Enzymes and Microbial Technology*, v. 19, p. 107-117, 1996.